



# OSIRHYS IV

*Outils de Simulation du comportement mécanique des Réservoirs de stockage haute pression de l'HYdrogène Spécifiques au type IV*

*(convention n°ANR-09-HPAC-010)*

**Stéphane Villalonga**

CEA

*stephane.villalonga@cea.fr*

**Présentation du projet et de son état d'avancement**



Coordinateur : CEA

Organismes de recherche :

ENSMA-Institut P'

ARMINES - Ecole des Mines de Paris

SYMME - Polytech' Annecy-Chambery



Projet labélisé par le(s) pôles(s) de compétitivité : S2E2, PLASTIPOLIS

Budget (M€)	Aide (M€)	Nombre de personnes.ans
2 264 890	999 294	25

Date de démarrage : 01/07/2010

Date de fin : 30/06/13

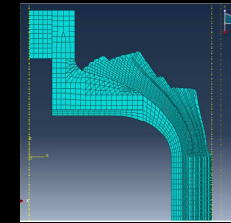


## Objectifs du projet :

- Qualifier les codes de calcul et les modèles permettant de dimensionner et d'optimiser les réservoirs de stockage haute pression de l'hydrogène.

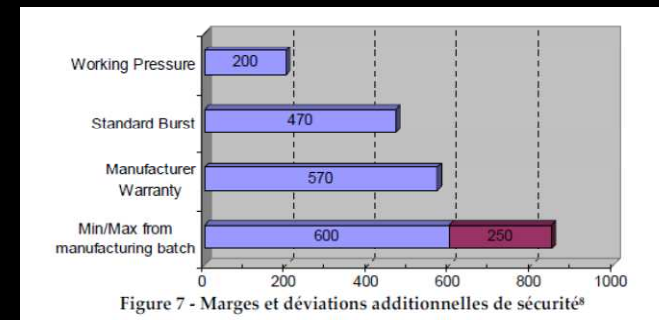
## Défis scientifiques et techniques :

- Choix puis conduite d'essais appropriés pour obtenir les données d'entrée des modèles ,
- Fabrications d'une série de réservoirs identiques,
- Essais réservoirs reproductibles fortement instrumentés,
- Analyse des défauts et de leur couplage,
- Modélisation du comportement des matériaux et de l'endommagement,
- Analyse des causes d'écart entre les calculs et les essais,
- Analyse des causes d'écart entre la structure modélisée et celle fabriquée,
- Réaliser des calculs probabilistes pour tenir compte des incertitudes,
- Optimiser de façon automatique la structure d'un réservoir.

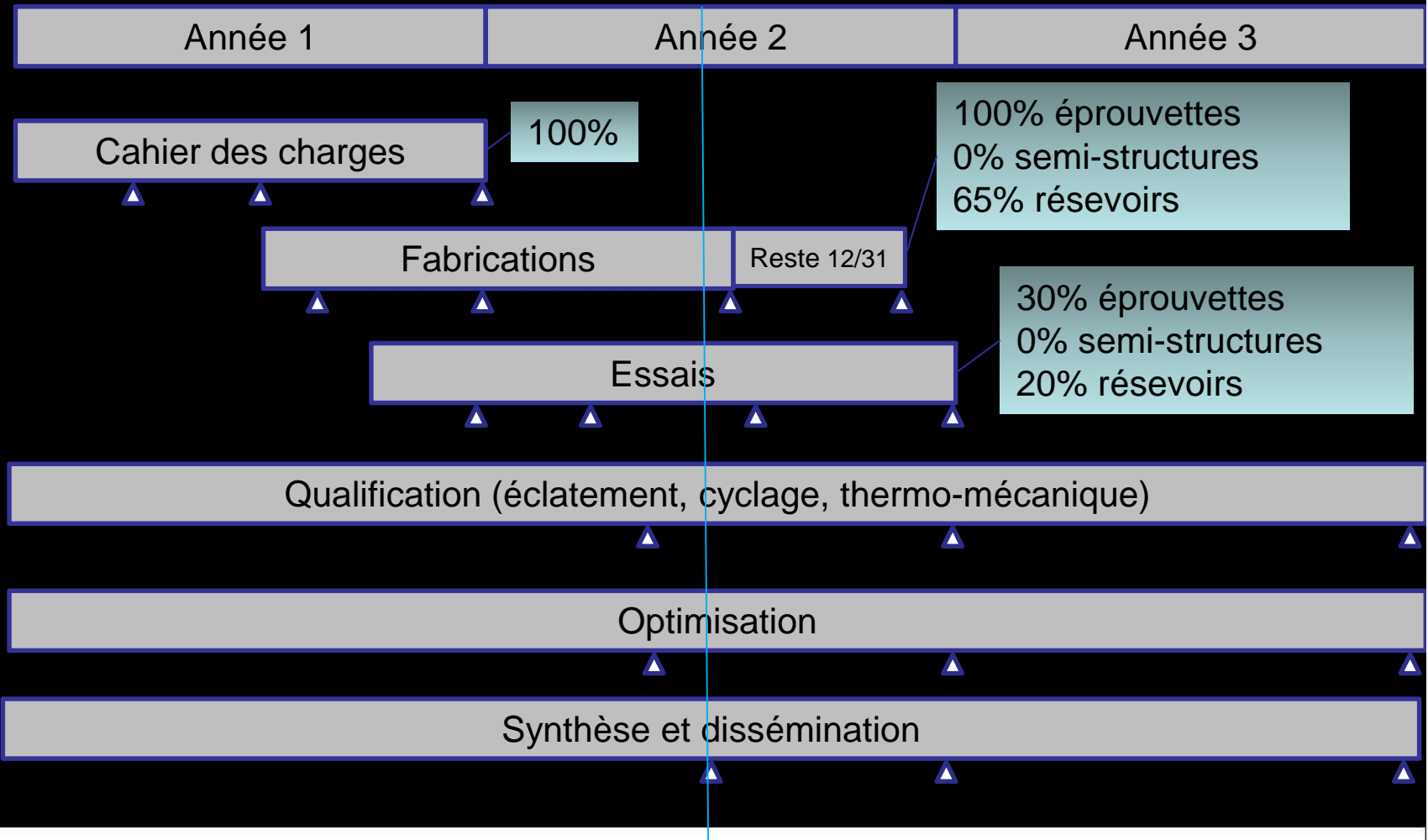
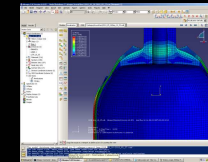


## Résultats majeurs escomptés :

- gain de masse sur réservoir,
- baisse du coût de fabrication du réservoir,
- phase de développement d'un réservoir plus rapide et moins onéreuse (moins d'essais),
- outils de simulation qualifiés (connaissance des incertitudes) pour le dimensionnement et l'optimisation des structures composites.



# Programme de travail et jalons :

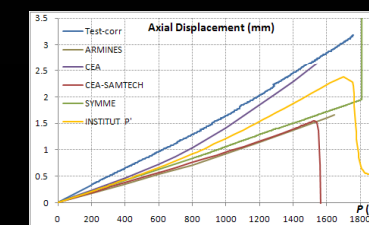
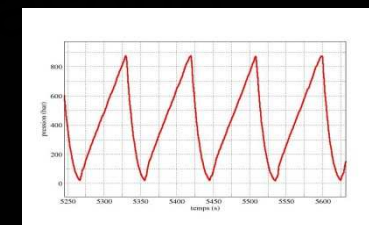






## Principaux résultats atteints par le projet :

- Mise au point du réservoir de référence (gain de 20% sur la masse du composite)
- Fabrication des éprouvettes (100%) et de réservoirs (19/31)
- Premiers essais réservoirs : éclatement (1800 bar), cyclage (actuellement 12700 cycles)
- Premières inter-comparaisons des simulations pour qualif. éclatement, thermo-mécanique
- Intégration de modèles d'endommagement (mode sain et non sain estimés)
- Premiers travaux d'optimisation : estimation d'un gain supplémentaire en masse de 20% avec une optimisation automatisée





## Faits marquants :

Gain de 20% sur la masse des premiers réservoirs : 1750g de composite

Automatisation de la fabrication, très bonne reproductibilité ( $\pm 15\text{g}/1750\text{g}$ )

Simulation du mode de rupture (sain/non sain)

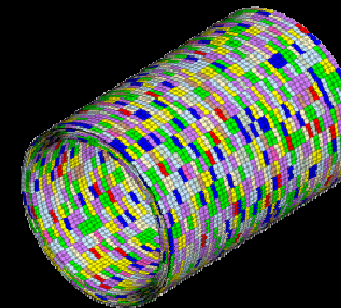
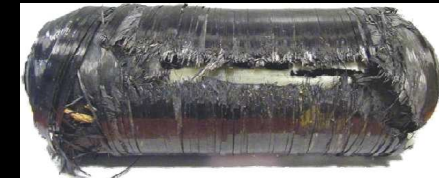
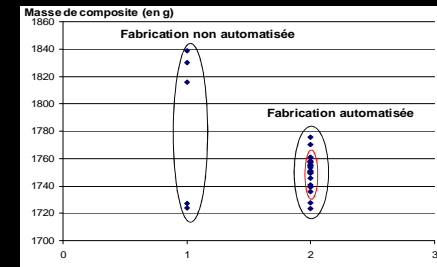
Gain supplémentaire possible avec optimisation automatique (20%: 1400g !)





## Conclusions :

- Avancement globalement conforme au planning initial,
- Mise au point d'une fabrication de réservoirs très reproductible,
- Modélisation d'endommagements du composite : estimation du comportement sain ou non sain du réservoir durant un calcul d'éclatement,
- Premiers travaux d'optimisation automatique de la structure composite du réservoir,
- Premiers calculs probabilistes tenant en compte les dispersion de propriétés des matériaux à l'endommagement,
- Prévoir la finalisation des fabrications réservoirs (reste 12/31) et structures simples ainsi que des essais associés.



## Retombées et perspectives scientifiques et industrielles :

- Outils qualifiés,
- Méthodologies (conceptions fondées sur des méthodes déterministes ou probabilistes, optimisations multi-critères)
- Outils permettant aux bureaux d'études de mieux dimensionner les structures composites et aux fabricants de diminuer le coût de développement d'un réservoir (en rationalisant le nombre d'essais destructifs et le temps de développement) tout en minimisant la masse de fibre de carbone (diminution du prix), la masse du système embarqué de stockage pour une meilleure efficacité énergétique du véhicule à pile à combustible.





## Publications / Communications issues du projet OSIRHYS IV :

- MECAMAT / Aussois M7 (poster)
- JNC 17 / Poitiers M12 (1 plenary session + 1 oral + 1 poster)
- PVP 2011 / Baltimore M13 (1 oral)
- Symposium Europe-Japon / Seoul M14 (1 oral)
- Journée utilisateur de SAMCEF / Hasselt M17 (1 oral)
- 3rd International Carbon Composite Conference / Arcachon M16 (1 oral)
- Séminaire HPAC / Montpellier M18 (1 oral)

## En prévision :

- ECCM15 / Venise M23 : 4 communications
- Article sur base ECCM15 pour « The journal of Hydrogen » : facteur d'impact = 4 : 1 article par partenaire + un article de synthèse

## Suivi projet :

- 1 réunion par trimestre
- des réunions « tête à tête » CEA/partenaire
- intérêt de 4-5 partenaires (pas plus)

Modèles d'endommagement utilisés par l'INSTITUT P'

- Rupture des fibres. Comportement fragile
- Fissuration matricielle et rupture de l'interface fibre - matrice. Comportement fragile
- Endommagement matriciel et inter pli lié au cisaillement. Comportement fortement non linéaire
- Déformation résiduelle due au glissement entre pli  $\pm\theta$

## Thèse / PostDoc :

- 2 thèses :

- ENSMA – Institut P'
- Juan-Pedro Berro-Ramirez
- suivi par Damien Halm
  
- SYMME – Polytech' Anecy-Chambéry
- David Leh
- suivi par Philippe Saffré

- 2 PostDocs :

- ARMINES – Ecole des mines de Paris
- Pongsak Nimdum
- suivi par Jacques Renrad
  
- CEA- Le Ripault
- Maxime Bertin
- suivi par Stéphane Villalonga







# Présentation technique



## Projet OSIRHYS IV

*Outils de Simulation du comportement des Réservoirs de stockage d'HYdrogène Spécifiques au type IV (convention n°ANR-09-HPAC-010)*

**S. Villalonga\***, **P. Saffré\*\***, **J. Renard\*\*\***, **D. Halm\*\*\*\***



\*CEA, DAM, Le Ripault, F-37260 Monts, France



\*\*Polytech' Anancy-Chambéry SYMME, BP 80439, F-74944 Anancy Le Vieux, France



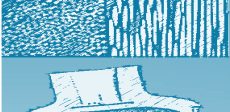
\*\*\*Centre des Matériaux P.M. Fourt, Mines Paris Tech, UMR CNRS 7633, Evry, France



\*\*\*\*ENSMA – Institut P', BP 40109, F-86961 Futuroscope-Chasseneuil, France



e-mail : [stephane.villalonga@cea.fr](mailto:stephane.villalonga@cea.fr)



# Sommaire



- Enjeux du stockage H<sub>2</sub>
- Réservoir de type IV
- Osirhys IV
- Qualification des codes de calcul
- Conclusion





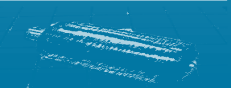
## Enjeux

Rés. type IV

Osirhys IV

Qualification

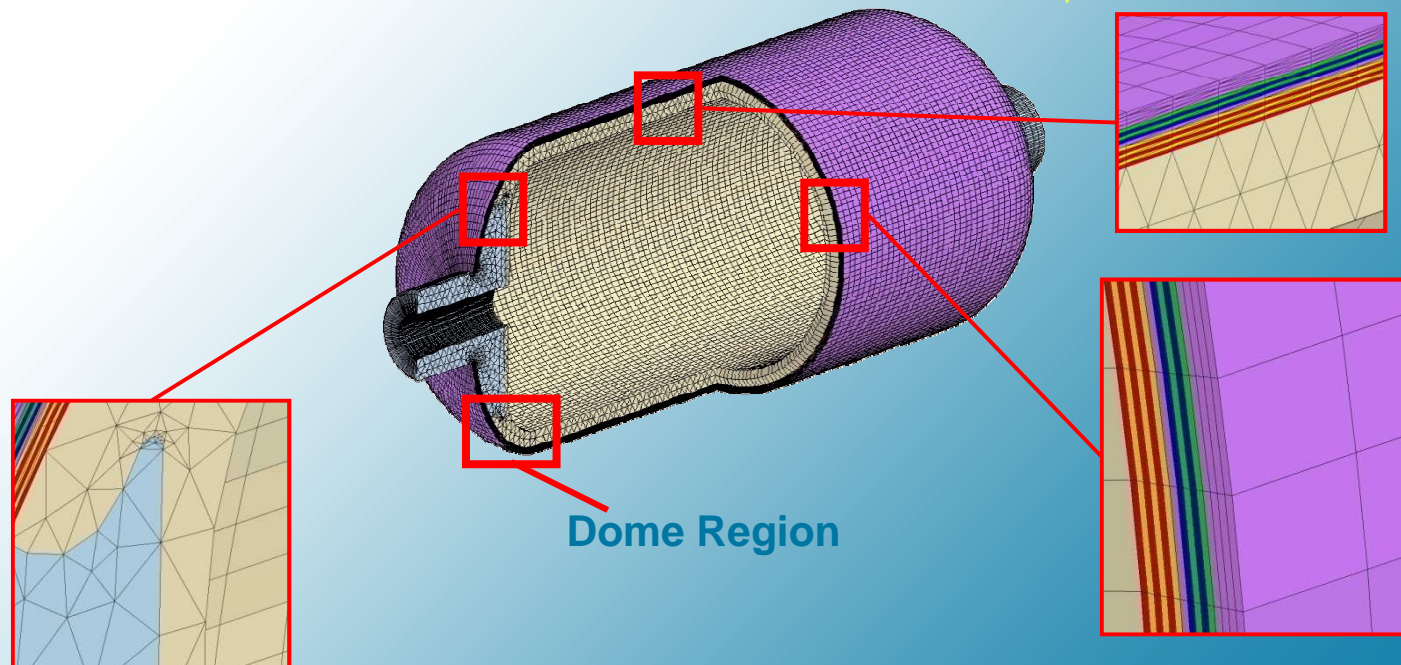
Conclusion



# Enjeux vs Etat de l'art

## Réduction des coûts :

- Normes et Réglementations (RCS),
- Nouveaux matériaux (fibres, matrices),
- Production de masse,
- Protections externes,
- Conception et Optimisation du réservoir





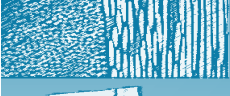
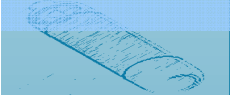
Enjeux

Rés. type IV

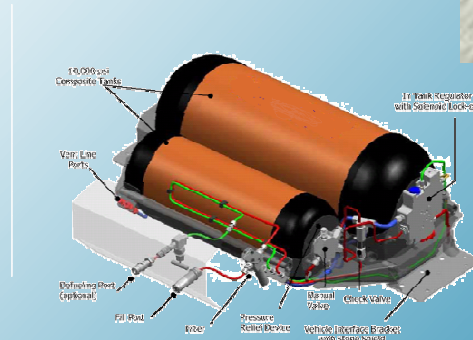
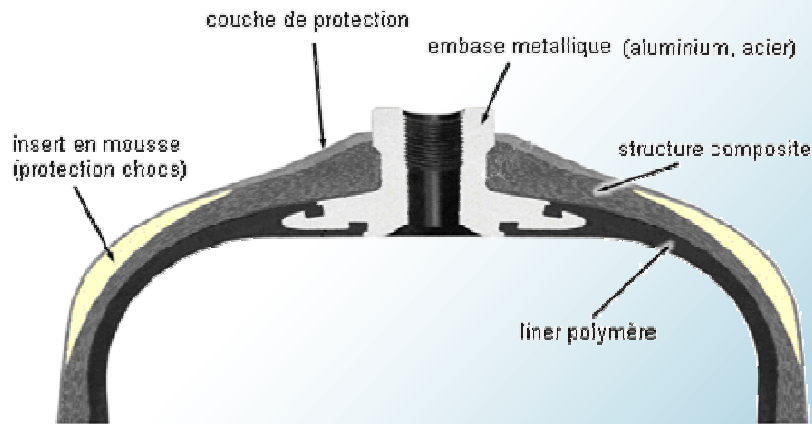
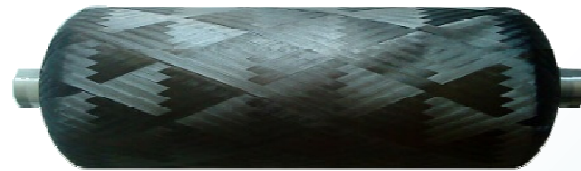
Osirhys IV

Qualification

Conclusion



# Réservoir Composite de Type IV







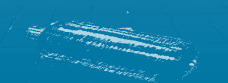
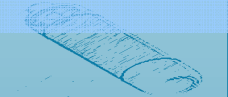
Enjeux

Rés. type IV

Osirhys IV

Qualification

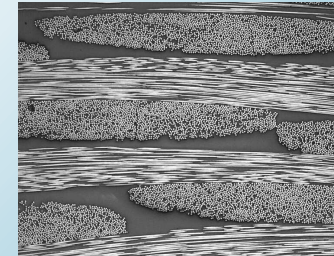
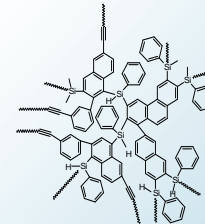
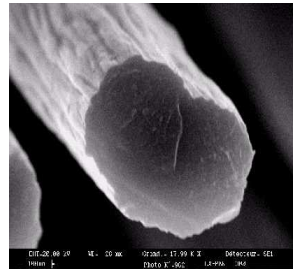
Conclusion



# Réservoir Composite de Type IV



## Matériau composite : renfort + matrice



- 210 000 km de fibre de carbone de 7  $\mu\text{m}$  de diamètre sur un réservoir 700 bar 37L
- matériau fortement anisotrope

## Réservoir CEA 700 bar de type IV



### PERFORMANCES ATTEINTES

Pression nominale : 700 bar

Volume : 37L

Masse totale : 28 kg

Capacité massique de stockage  $\text{H}_2$  : 5,4%

Nombre de cycles 20-875 bar >> 15.000 cycles

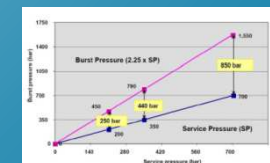
Pression éclatement : 1700 bar

### STORHY (2004-2008)

IP, 6th Frame Work

Leader : Magna Steyr

40 Partners : Daimler, BMW, PSA, Air Liquide, Volvo, Fiat, ...





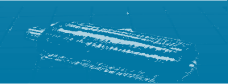
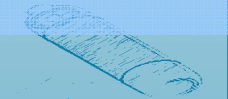
Enjeux

Rés. type IV

**Osirhys IV**

Qualification

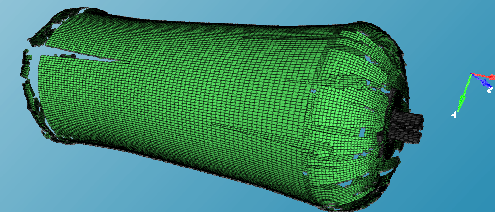
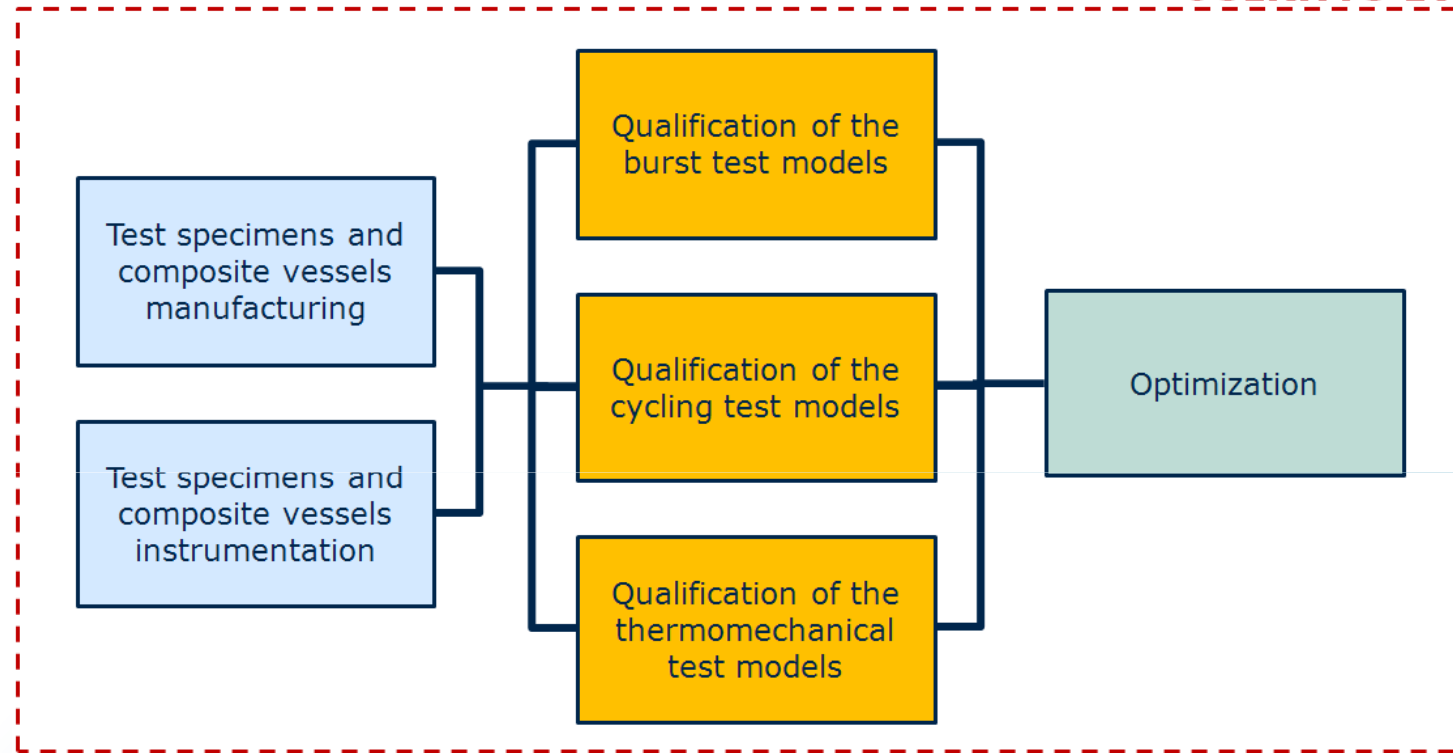
Conclusion



# Osirhys IV



## OSIRHYS IV





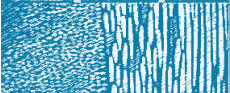
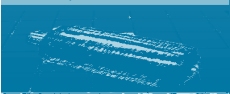
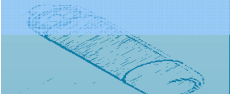
Enjeux

Rés. type IV

Osirhys IV

**Qualification**

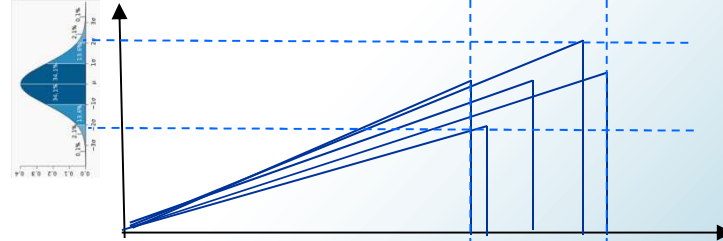
Conclusion



NWP (Nominal Working Pressure: 700 bar)

SF (Safety Factor)

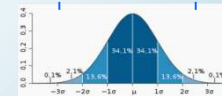
Déplacement



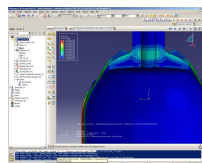
Incertitudes expérimentales :

- E1: réservoirs (très grandes),
- E2: mesures,
- E3: expériences.

Type IV : test d'éclatement

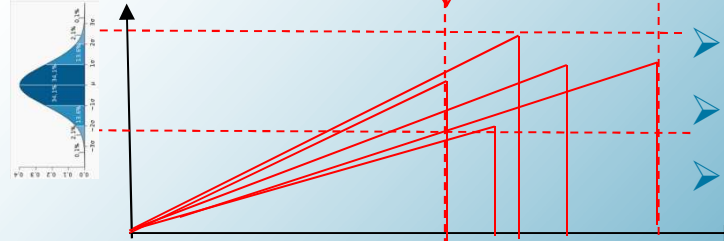


Pression



SF (Safety Factor issu du calcul)

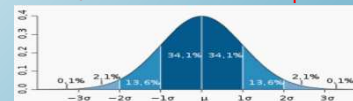
Déplacement



Incertitudes de calcul :

- C1: modélisation du réservoir,
- C2: model. du comportement méca,
- C3: model. de l'expérience (CI,CL).

Type IV : calcul d'éclatement



Pression

Suis-je certain des performances ? Suis-je certain que le coût est minimal ?





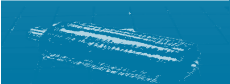
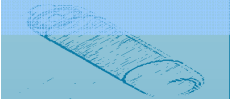
Enjeux

Rés. type IV

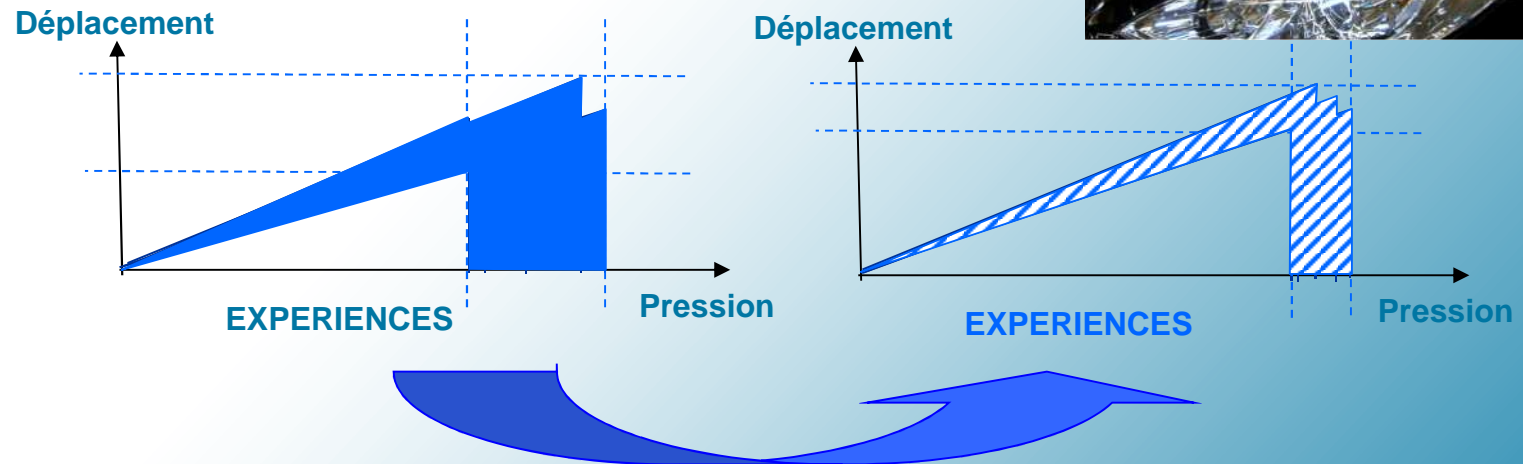
Osirhys IV

Qualification

Conclusion



# Incertitudes Réelles - Objectif



Minimisation des incertitudes E1 en augmentant la qualité du matériau fabriqué et la qualité du procédé

Incertitudes expérimentales :

- E1: réservoirs (très grandes),
- E2: mesures,
- E3: expériences.

Petite série

Industriel PME

=>  $\pm 15g$  (<1%) de composite sur 1750g



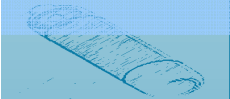
Enjeux

Rés. type IV

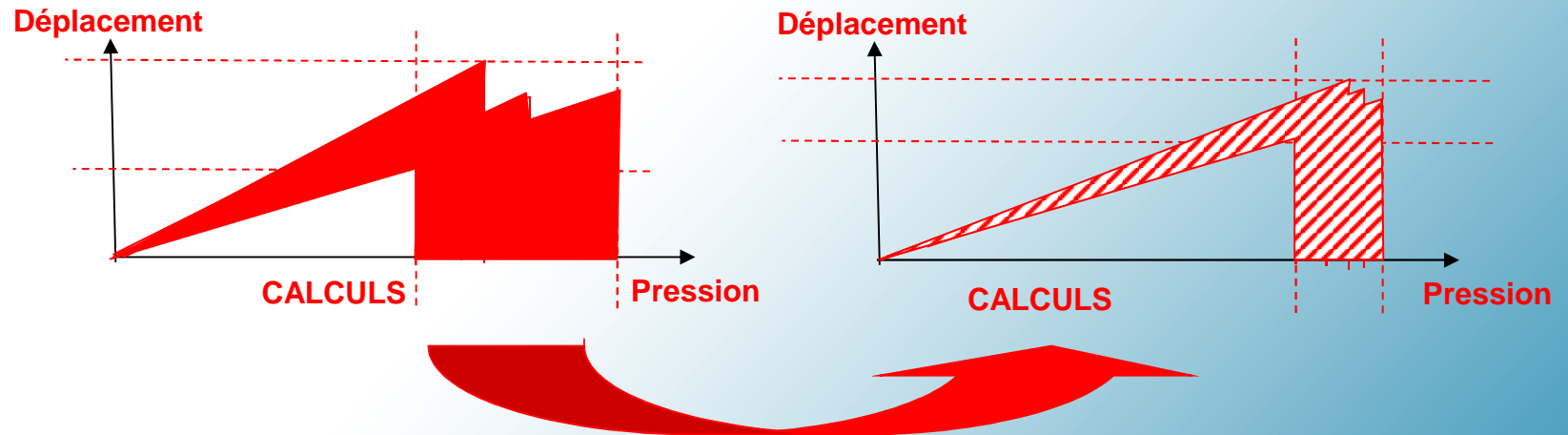
Osirhys IV

Qualification

Conclusion



# Incertitudes Virtuelles - Objectif



**Minimisation des incertitudes C1, C2, C3 en qualifiant les codes de calcul**

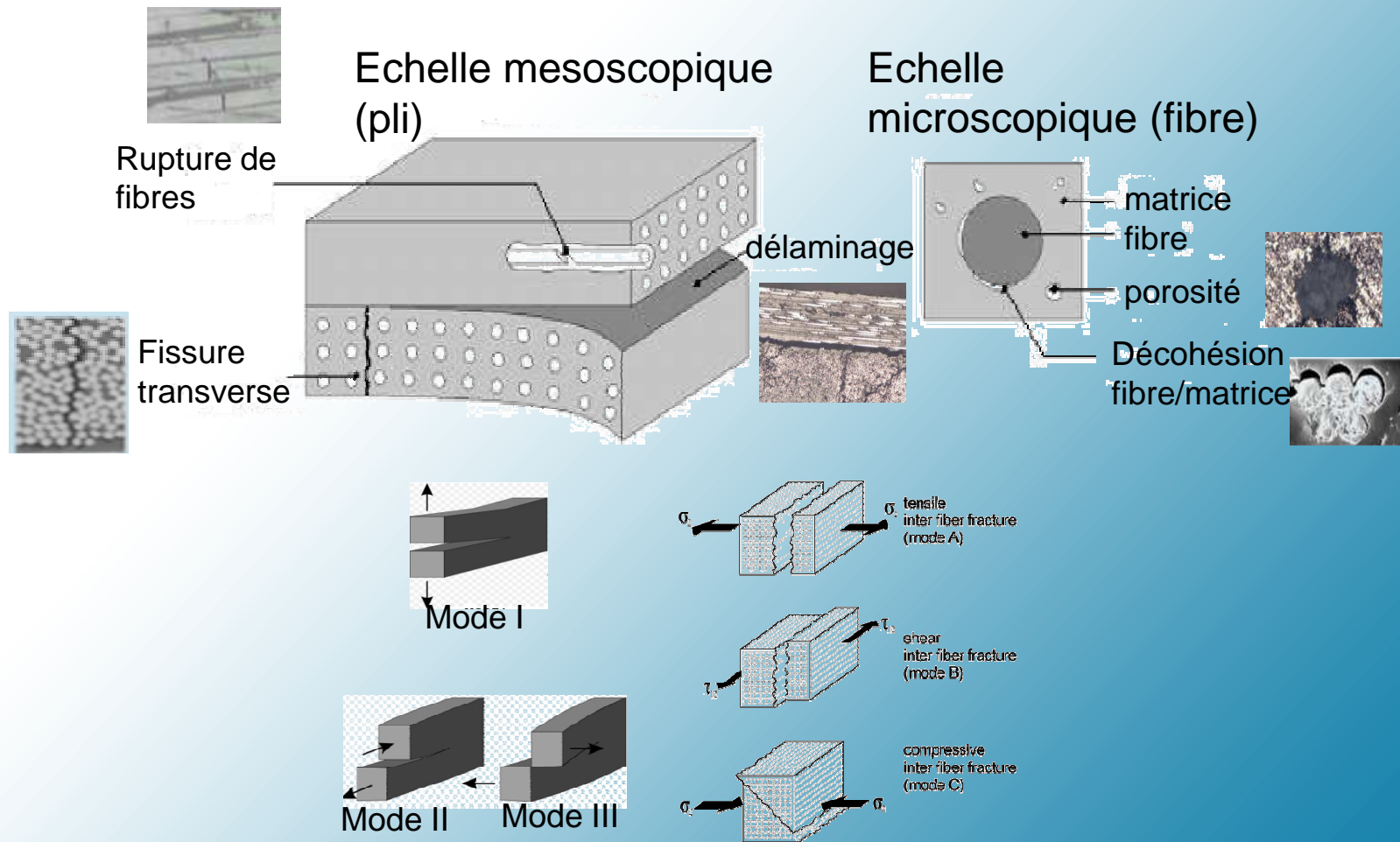
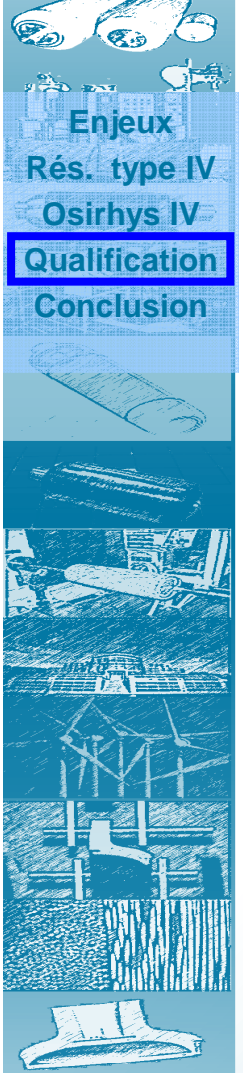
Incertitudes de calcul :

- C1: modélisation du réservoir,
- C2: model. du comportement méca,
- C3: model. de l'expérience (CI,CL).

Qualification  
des codes +  
méthodologie  
de propagation  
des incertitudes

Echelles : macroscopique (structure), mesoscopique (pli), microscopique (fibre)

énergie atomique • énergies alternatives







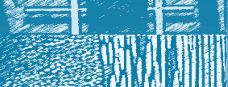
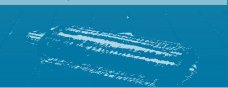
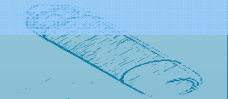
Enjeux

Rés. type IV

Osirhys IV

Qualification

Conclusion

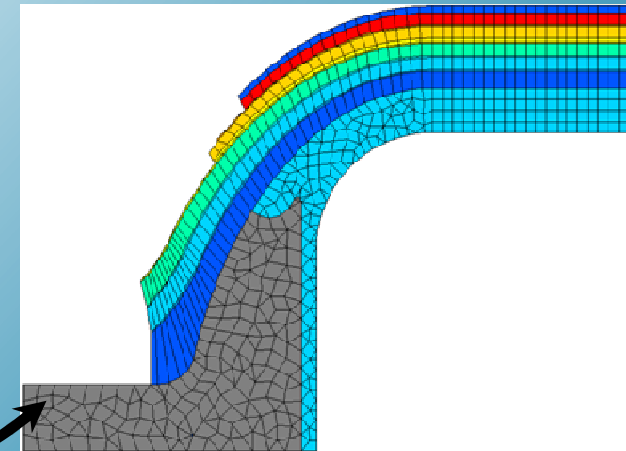
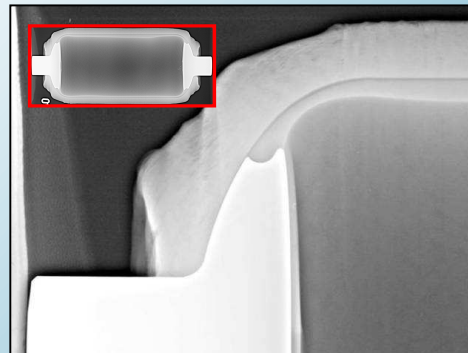
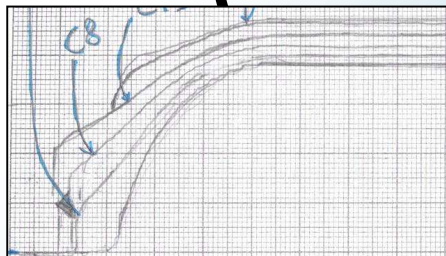
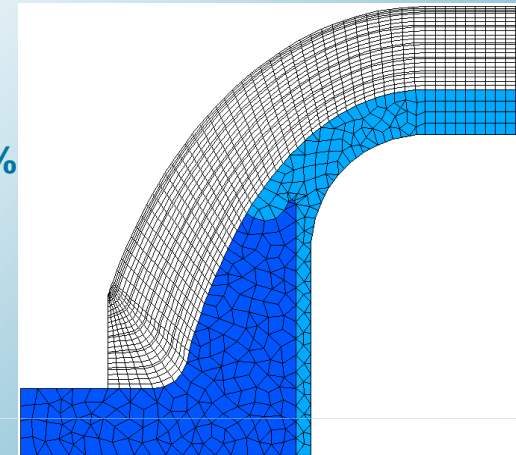


## C1: modélisation du réservoir



1ère approche de modélisation:

- Toutes les couches recouvrent 100% du dôme
- variation linéaire des épaisseurs de couche
- Orientations constantes dans les dômes (=orientation virole)





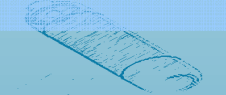
Enjeux

Rés. type IV

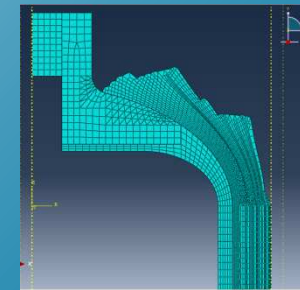
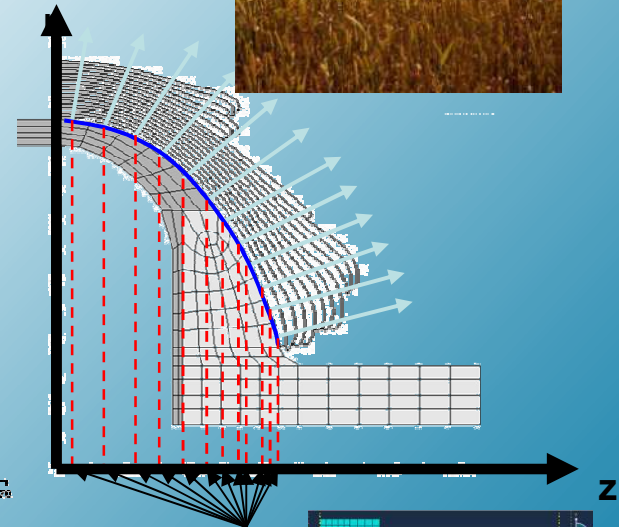
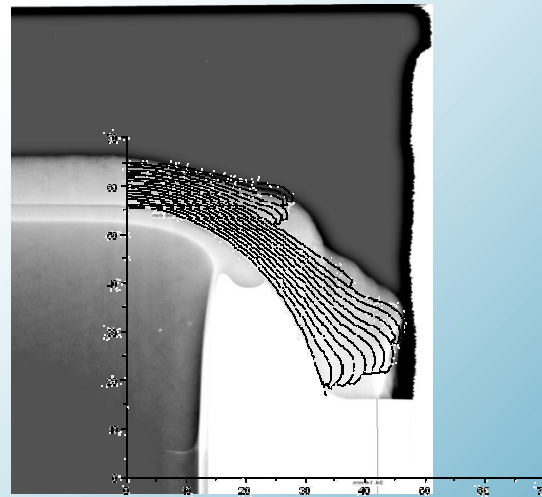
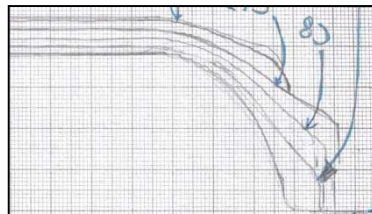
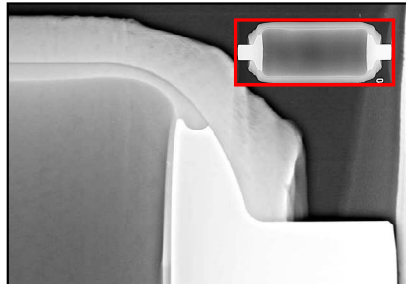
Osirhys IV

Qualification

Conclusion



## C1: modélisation du réservoir



- Paramètre d'entrée : angle et épaisseur sur la virole
- Comparaison du modèle avec radiographie d'un vrai réservoir
- Hypothèse initiale de trajectoire géodésique



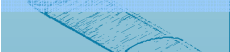
Enjeux

Rés. type IV

Osirhys IV

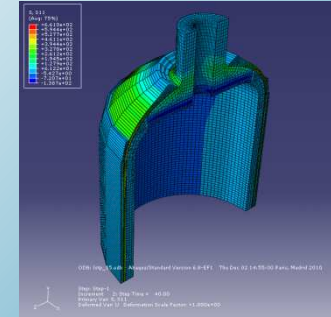
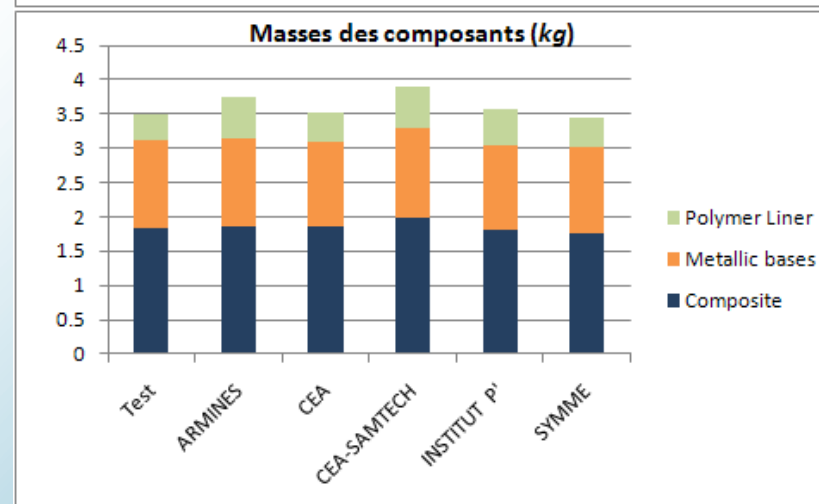
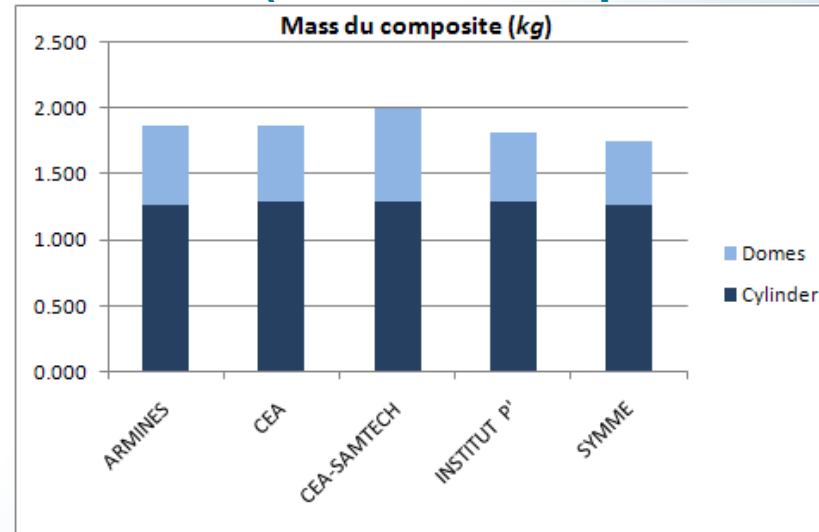
**Qualification**

Conclusion



## C1: modélisation du réservoir

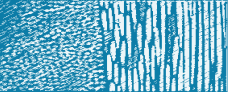
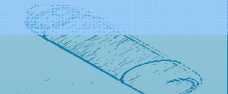
Incertitudes masse = f(modélisation, partenaire)







Enjeux  
Rés. type IV  
Osirhys IV  
Qualification  
Conclusion

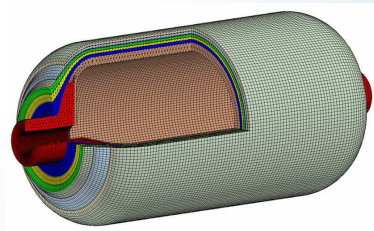


# Incertitudes Virtuelles – Modélisation réservoir

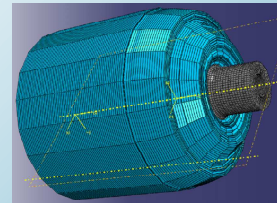


## ➤ FE model comparison

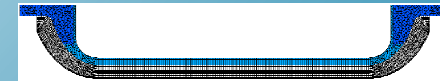
Partner	FE Model Hypothesis	FE code	Dome modelisation	Degree of freedom
ARMINES (a)	volume	ZEBULON	Radiography inspection	$1,10 \times 10^6$
CEA (b)	Volume + symmetry	ABAQUS	ABAQUS Wound Composite	$4,60 \times 10^5$
CEA-SAMTECH (c)	Axisymmetry	SAMCEF	Simplified characteristics	$4,63 \times 10^4$
INSTITUT P' (d)	Axisymmetry	ABAQUS	ABAQUS Wound Composite	$7,73 \times 10^4$
SYMME (e)	Mindlin shell	ANSYS	Personal model	$2,86 \times 10^4$



(a)



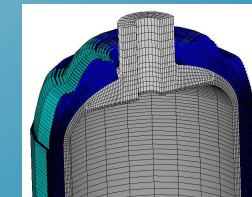
(b)



(c)



(d)



(e)



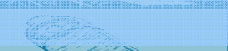
Enjeux

Rés. type IV

Osirhys IV

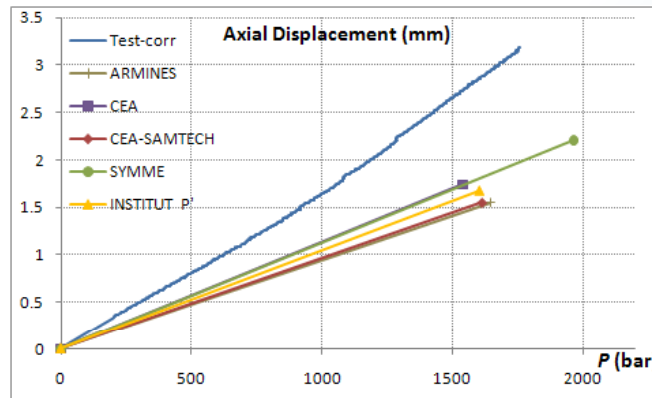
**Qualification**

Conclusion

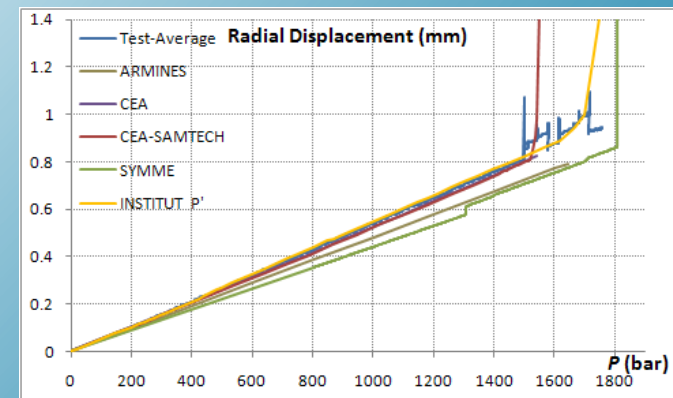
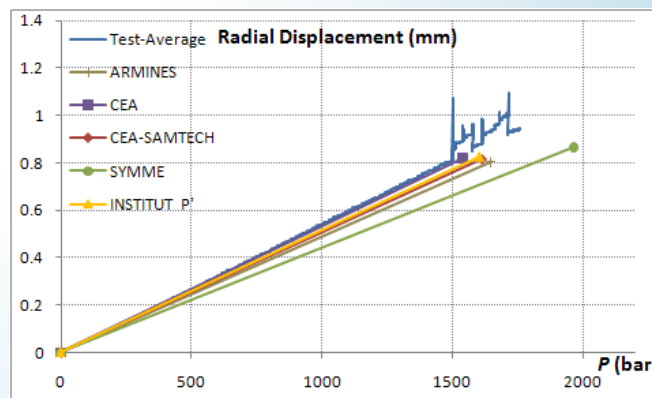
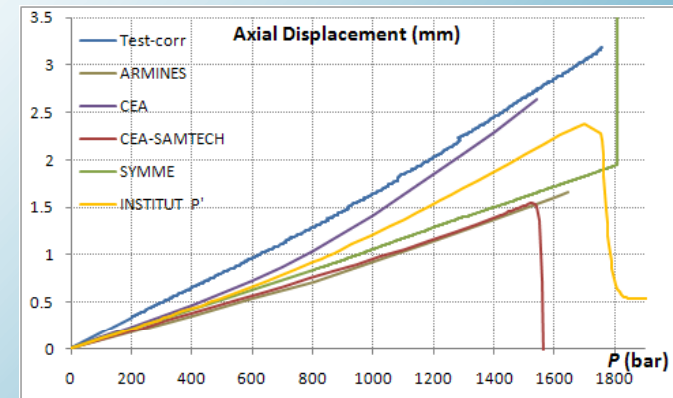


## C2: lois de comportement

### Statique Linéaire



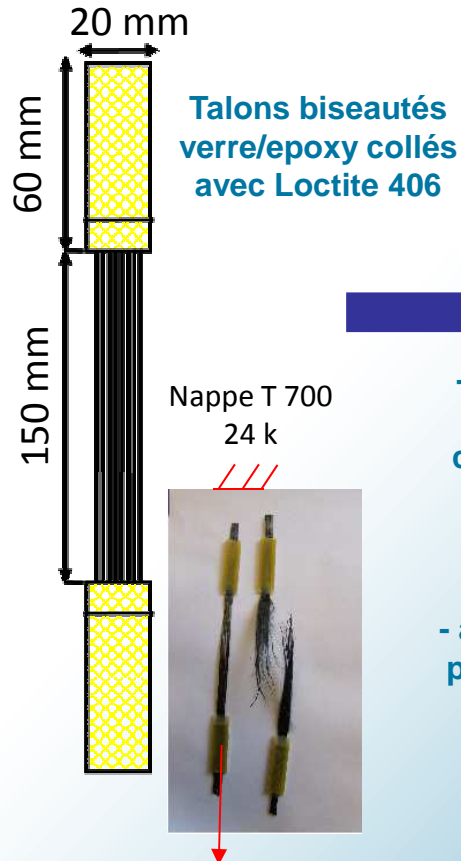
### Non Linéaire



## C2: lois de comportement

➤ Evaluation de la population de défauts d'une fibre :

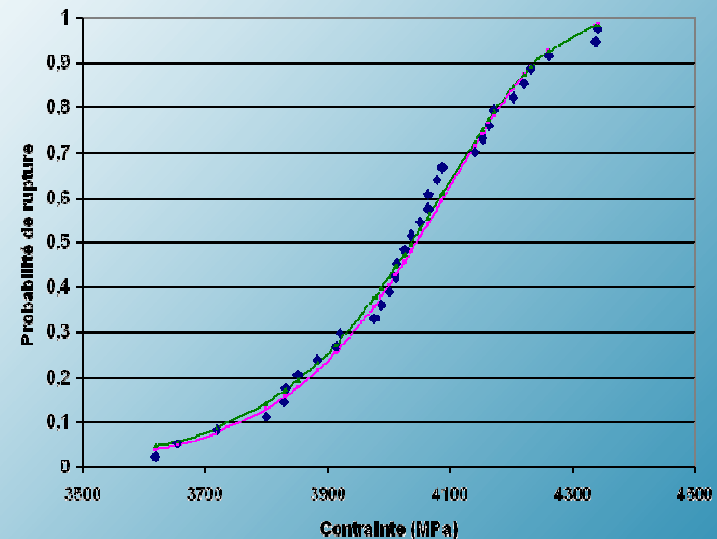
probabilité de rupture de fibre en fonction de la contrainte appliquée



-Classement  
des  
contraintes à  
rupture par  
ordre  
croissant

- attribution de  
probabilité de  
rupture

Probabilité de rupture en fonction de la contrainte appliquée  
(Statistique de Weibull)



$$P_r = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m} \quad m = 24.82$$

$$\sigma_0 = 4097 \text{ MPa}$$





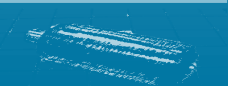
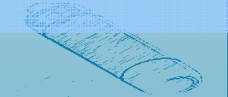
Enjeux

Rés. type IV

Osirhys IV

Qualification

Conclusion

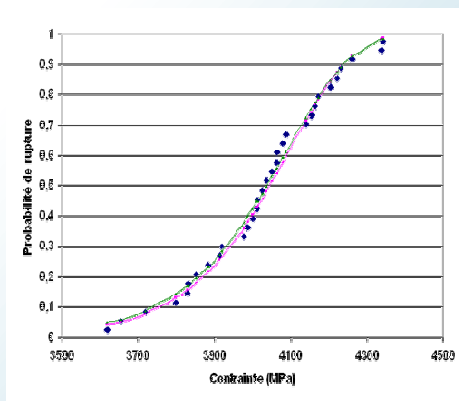
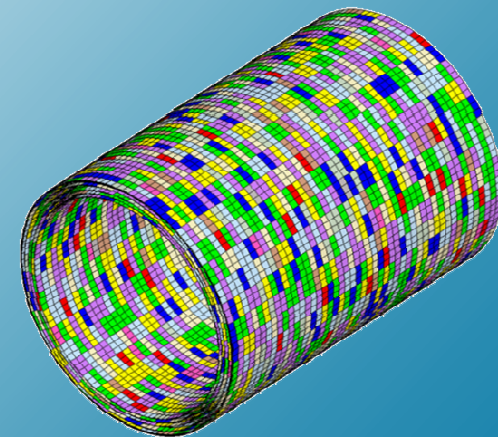
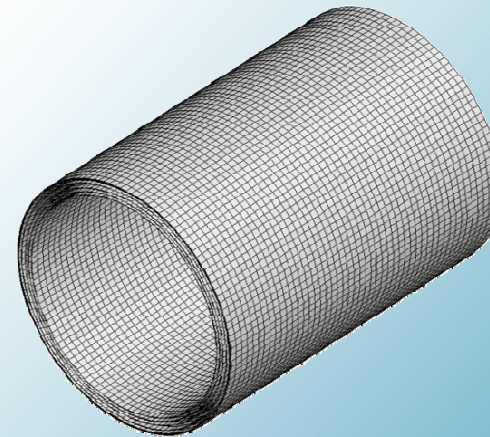
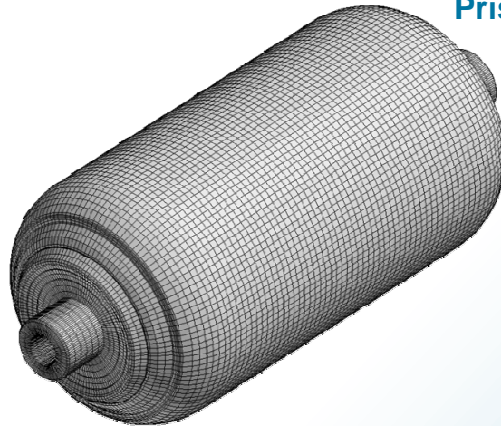


# Incertitudes Virtuelles – Lois de comportement



## C2: lois de comportement

Prise en compte des défauts d'une fibre



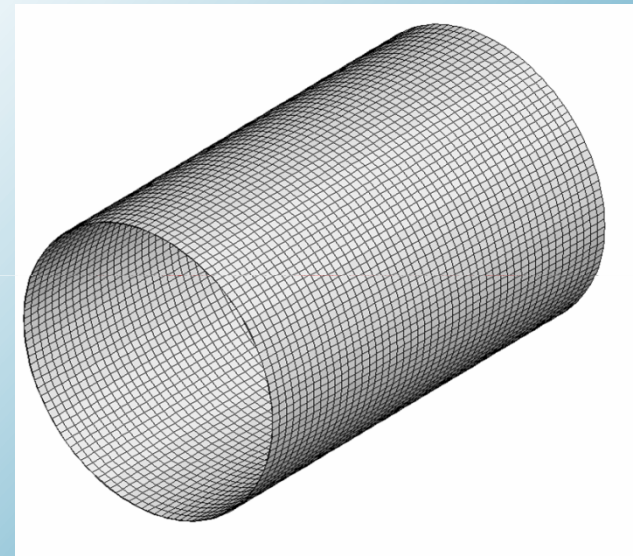
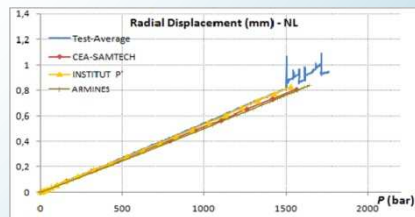
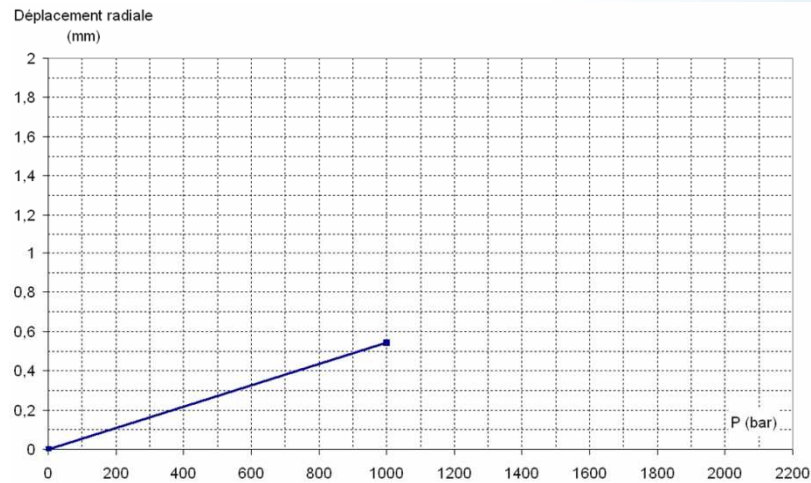


# Incertitudes Virtuelles – Lois de comportement



## C2: lois de comportement

Effet de la distribution aléatoire des ruptures de fibres sur le déplacement radial.



Ply 1





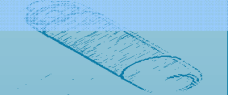
Enjeux

Rés. type IV

Osirhys IV

Qualification

Conclusion

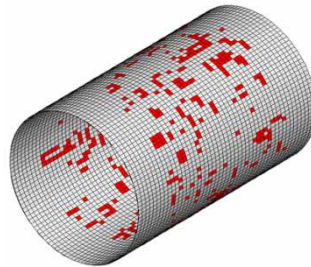


# Incertitudes Virtuelles – Lois de comportement

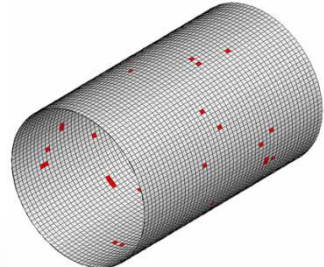


## Probabilistic distribution effect

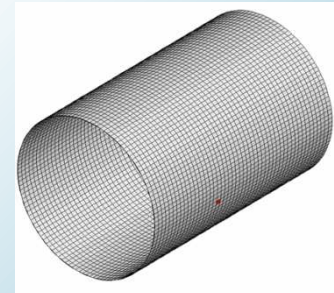
Calculation : 1400 bar



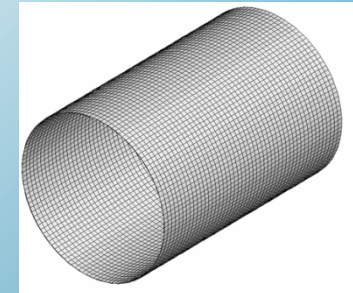
Ply 1



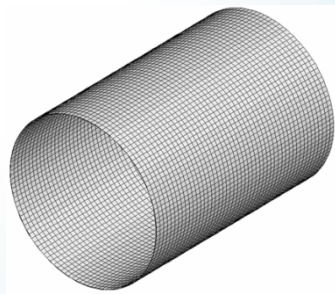
Ply 2



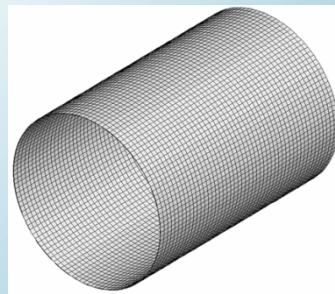
Ply 3



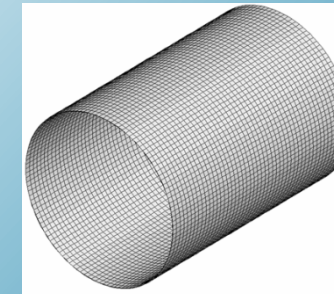
Ply 4



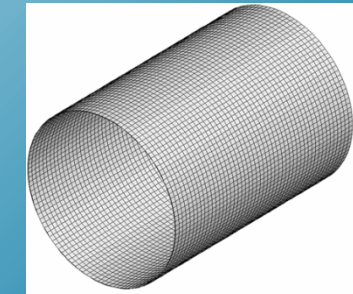
Ply 5



Ply 6



Ply 7



Ply 8



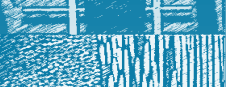
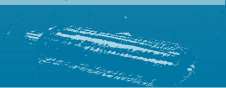
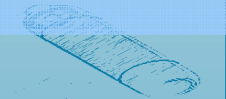
Enjeux

Rés. type IV

Osirhys IV

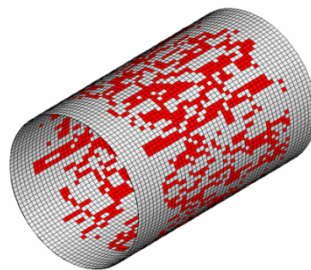
Qualification

Conclusion

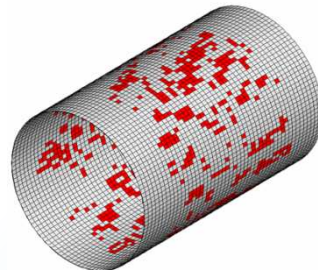


## Probabilistic distribution effect

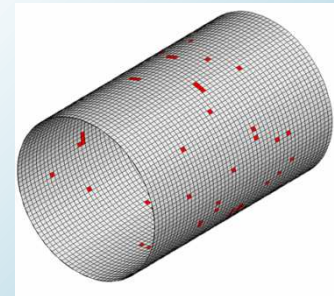
### Calculation : 1500 bar



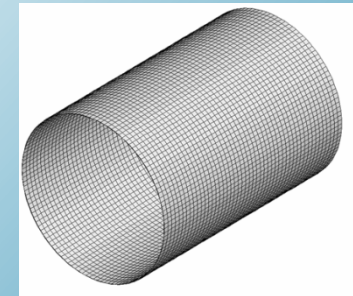
Ply 1



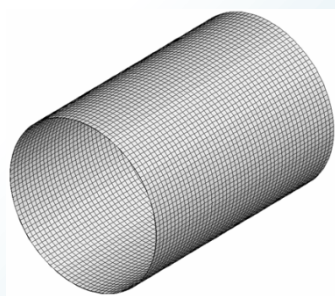
Ply 2



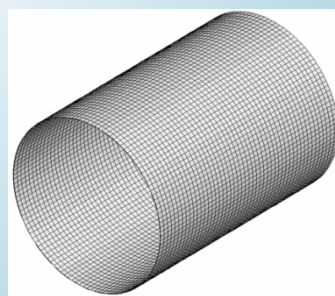
Ply 3



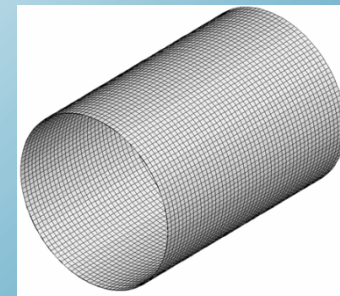
Ply 4



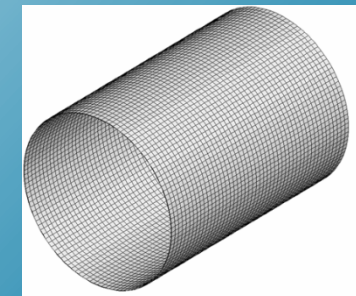
Ply 5



Ply 6



Ply 7



Ply 8





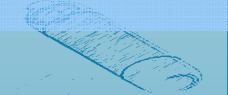
Enjeux

Rés. type IV

Osirhys IV

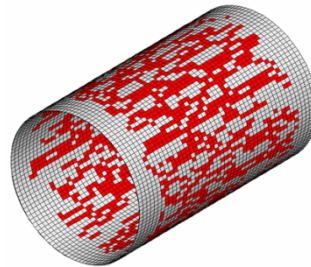
Qualification

Conclusion

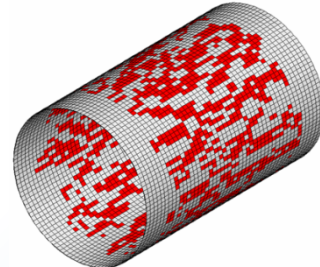


## Probabilistic distribution effect

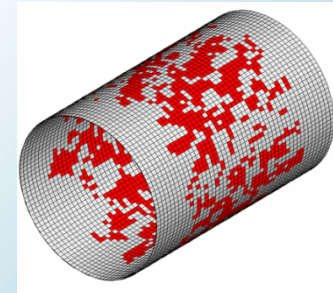
### Calculation : 1600 bar



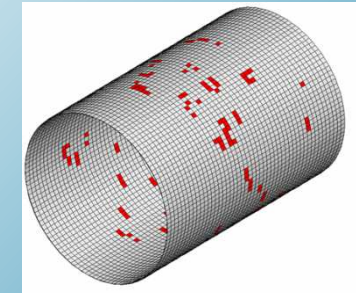
Ply 1



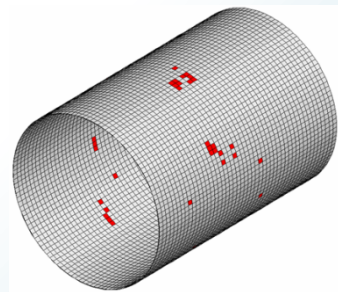
Ply 2



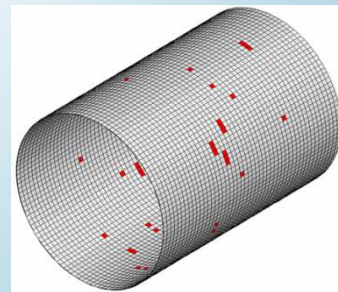
Ply 3



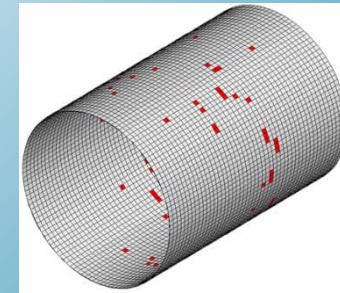
Ply 4



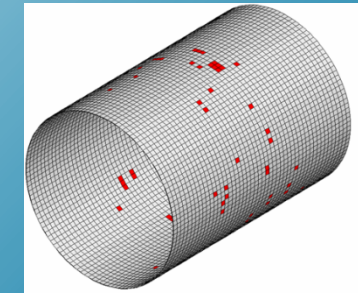
Ply 5



Ply 6



Ply 7



Ply 8



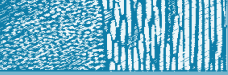
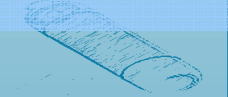
Enjeux

Rés. type IV

Osirhys IV

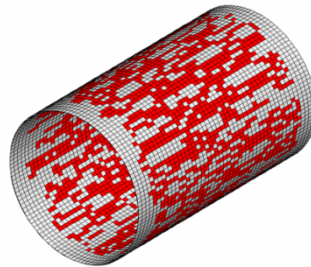
Qualification

Conclusion

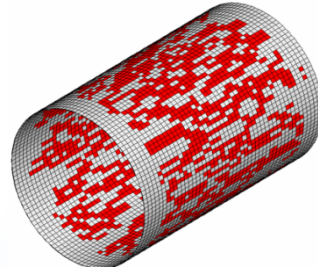


## Probabilistic distribution effect

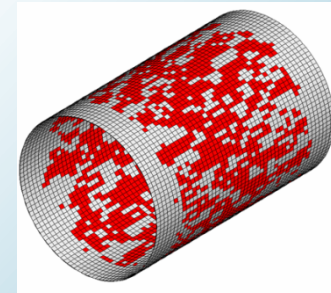
### Calculation : 1700 bar



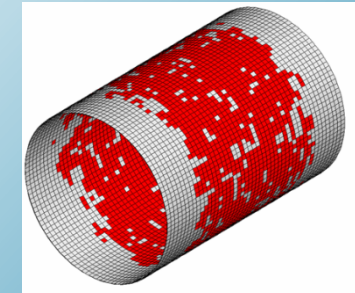
Ply 1



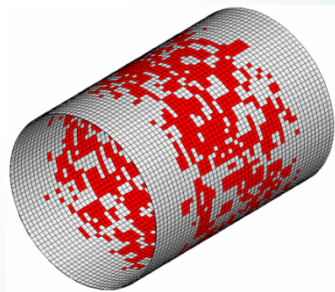
Ply 2



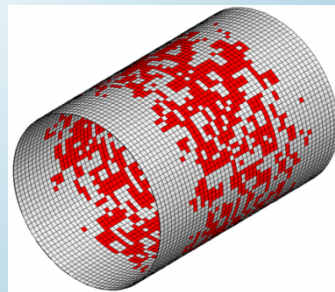
Ply 3



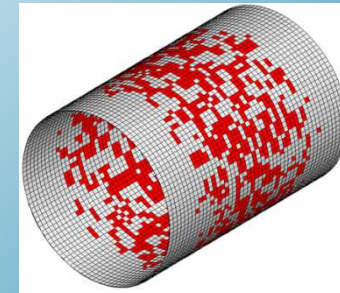
Ply 4



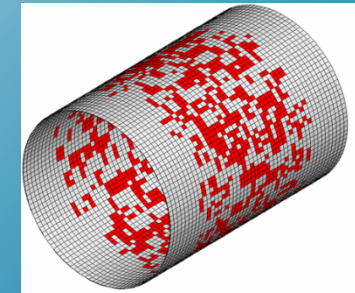
Ply 5



Ply 6



Ply 7



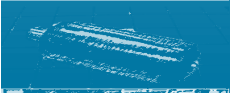
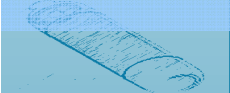
Ply 8





Enjeux  
Rés. type IV  
Osirhys IV

Qualification  
Conclusion



# Incertitudes Virtuelles – Modél. Expérience



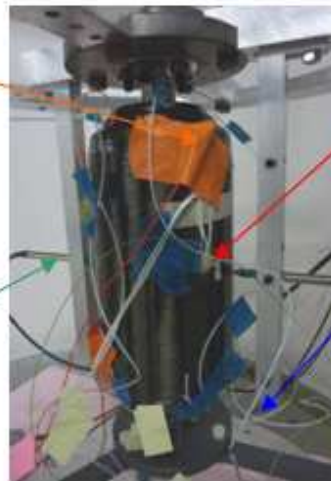
C3: modélisation de l'expérience (CI, CL)



Essais sur réservoir : LSTP\_10\_66 (septembre 2011)

Essai sur réservoir avec fibres optiques, jauges de déformation, EA, palpeur pour le déplacement radial, caméra rapide (mesure du champ de déplacement)

Capteurs d'émission  
acoustique

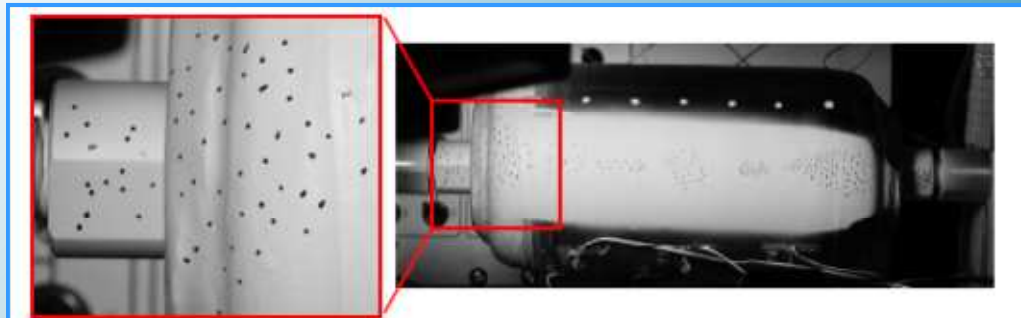
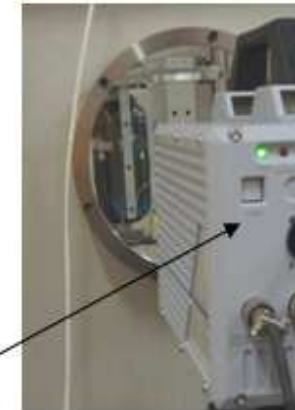


Jauge de déformation

Gaines protectrice  
capteur fibre optique  
et/ou réseau de Bragg

Palpeur de  
déplacement

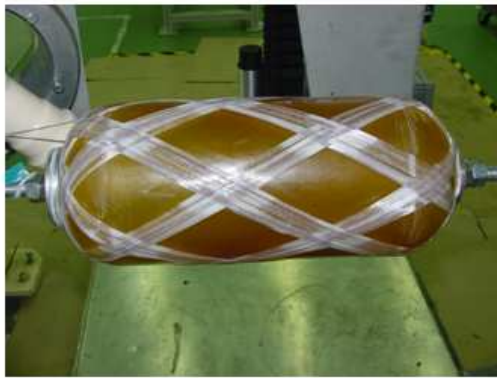
Caméra rapide



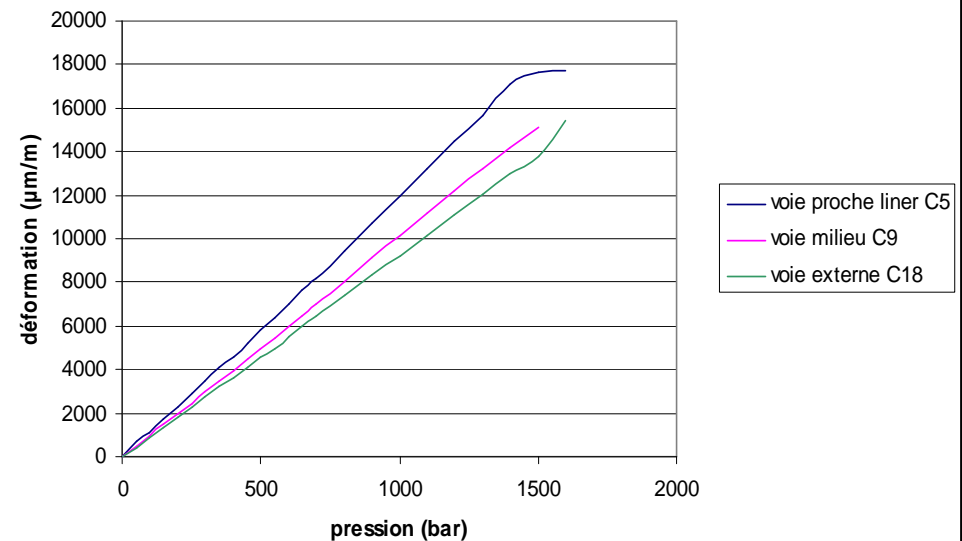
## C3: modélisation de l'expérience (CI, CL)

## Positionnement des fibres optiques

- FO : mesures continues le long de la fibre au cours de palier de pression
- Réseaux de Bragg : mesures locales au cours de l'essai



Comparaison de la déformation selon la localisation de la FO dans la couche composite





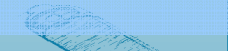
Enjeux

Rés. type IV

Osirhys IV

**Qualification**

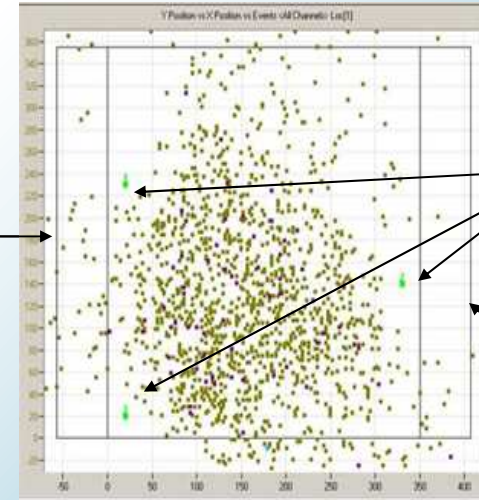
Conclusion



### Emission acoustique

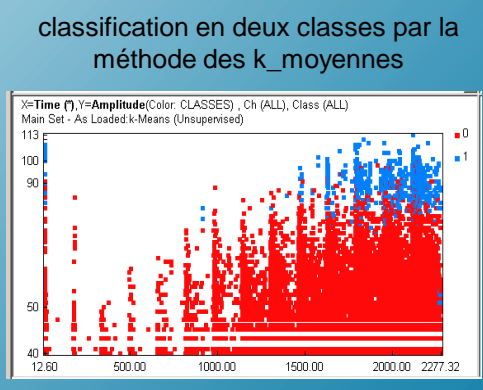
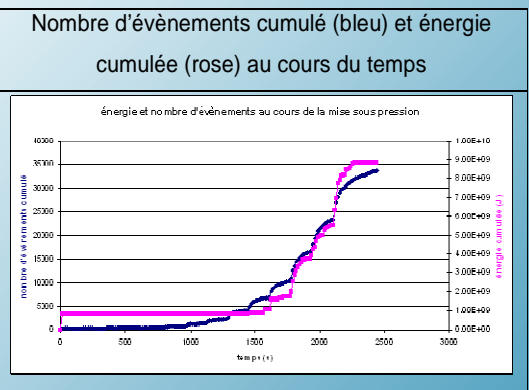
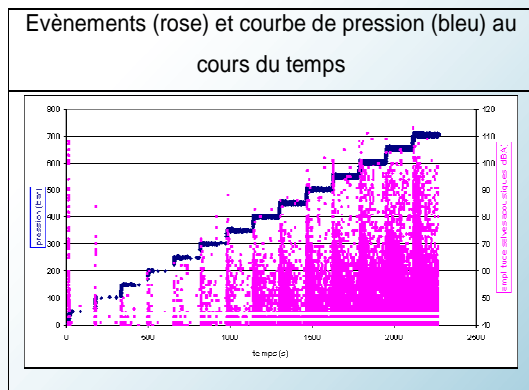


Zone de tête de bouteille



Capteurs acoustiques

Fond de la bouteille







## Conclusion – Perspective

### Minimisation des incertitudes de fabrication

Forte instrumentation (CND) pour récupérer de nombreuses informations pour la qualification des codes (fibres optiques, émission acoustique, mesure de champs)

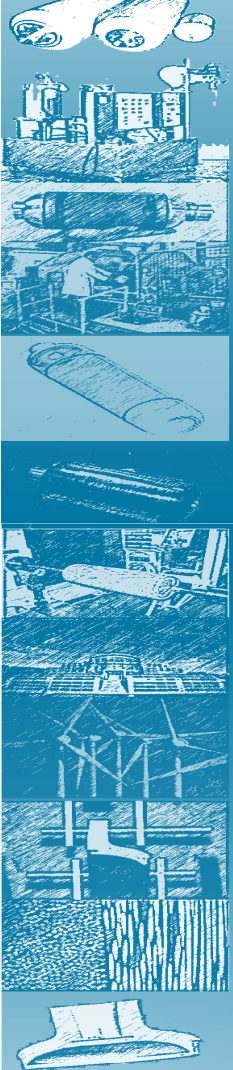
Prise en compte des non linéarités géométriques et d'endommagements, amélioration de la prédiction des codes de calcul.

Optimisations successives de la structure composite avec baisse de la masse composite de 20% (mise au point fab. réservoir) et 20% (à confirmer : par optimisation automatique du réservoir)

L'approche probabiliste peut être un moyen de calculer encore mieux l'expérience en tenant compte des distributions de propriétés d'endommagement.







# Remerciements

- *Remerciements à l'ANR :*
  - *Ces travaux ont été en partie financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) au travers du programme Hydrogène et piles à combustible (projet OSIRHYS IV n°ANR-09-HPAC-010)*
- *Remerciements aux partenaires du projet :*
  - *SYMME – Polytech' Annecy-Chambéry (Philippe, David)*
  - *ENSMA- Institut P'- Poitiers (Damien, Juan-Pedro)*
  - *ARMINES – Ecole des mines de Paris (Jacques, Baramée, Pongsak)*
  - *CEA – Le Ripault – Tours (Maxime, Christophe, Pascal, Céline ainsi que Philippe et Benoit)*