

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

A  
AREVA  
l'avenir pour énergie

[www.cea.fr](http://www.cea.fr)  
[www.areva.com](http://www.areva.com)

# Découpe et Robotique (CEA) Génération de trajectoire (Areva)

Académie des sciences



Yves SOULABAILLE (CEA) ([yves.soulabaile@cea.fr](mailto:yves.soulabaile@cea.fr))  
Aloys OUVRARD (AREVA) ([alloys.ouvrard@areva.com](mailto:alloys.ouvrard@areva.com))

8 OCTOBRE 2014

## La découpe et sa mise en œuvre en Robotique (CEA/DEN/DTEC : Yves SOULABAILLE)

- Les besoins en démantèlement
- Les différents types de procédés de découpe
- Les développements de têtes laser pour le DEM
- Le procédé de mise en œuvre à distance Maestro
- La découpe par laser en condition opérationnelle

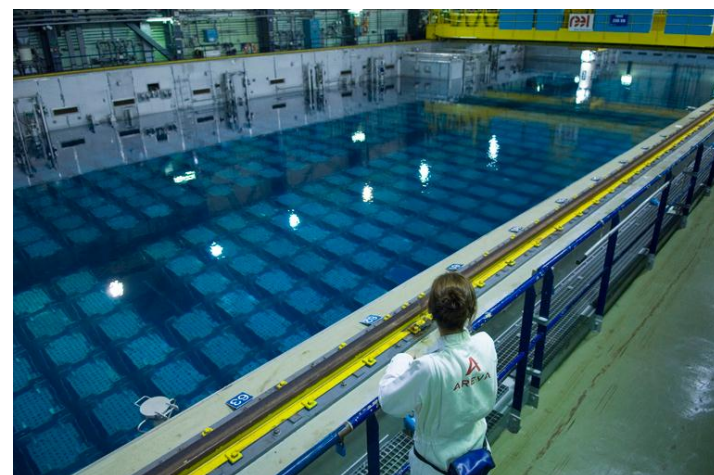
## Génération de trajectoires à partir d'un nuage de points (AREVA NC DSDT : Aloys OUVRARD)

- Contexte et objectifs
- Principes techniques
- Conclusion

**1<sup>ère</sup> PARTIE**

**LA DÉCOUPE  
ET  
SA MISE EN ŒUVRE  
EN ROBOTIQUE**

# LA DÉCOUPE ET SA MISE EN ŒUVRE EN ROBOTIQUE : LES BESOINS EN DÉMANTÈLEMENT



# LA DÉCOUPE ET SA MISE EN ŒUVRE EN ROBOTIQUE : LES DIFFÉRENTS TYPES DE PROCÉDÉS DE DÉCOUPE

Mécaniques

- Fraisage, perçage, moletage, rabotage (pour les bétons) mais aussi disceuse, scies (alternative, à ruban ou circulaire), cisaille, coupe tôle, découpe au jet et également explosif
- Principales caractéristiques
  - Motorisation : électrique, pneumatique ou hydraulique,
  - Reprise d'effort (vibrations, efforts de coupe)
  - Contraintes de positionnement (axes d'avances contraints)
  - Peu de déchets secondaires, aucun aérosol, sauf rabotage des bétons et explosif

Thermiques

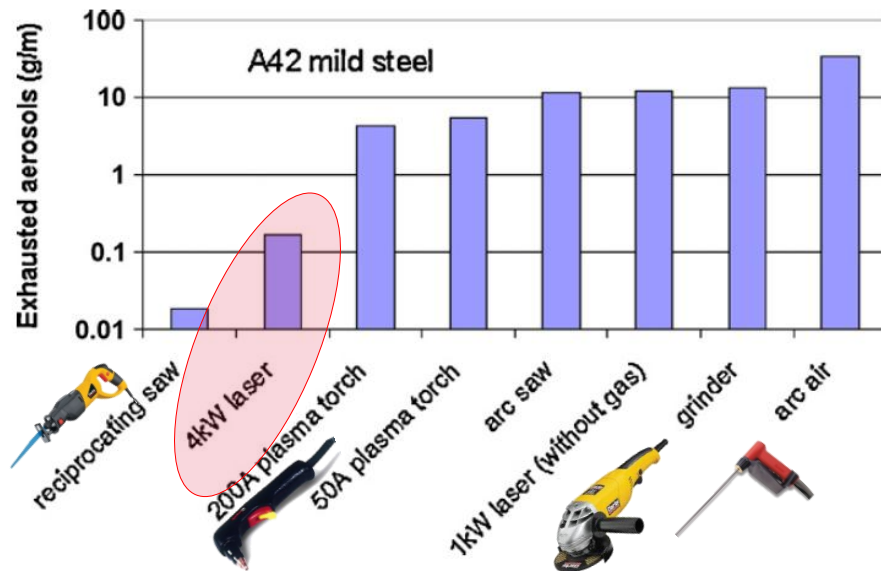
- Oxycoupage aux gaz, à l'arc, torche plasma, coupage à l'arc à l'électrode en carbone (ARCAIR), découpe au laser
- Principales caractéristiques
  - Découpe par fusion du matériau
  - Pas d'efforts mécaniques de découpe
  - Productivité très variable
  - Production de déchets secondaires, en particulier des aérosols



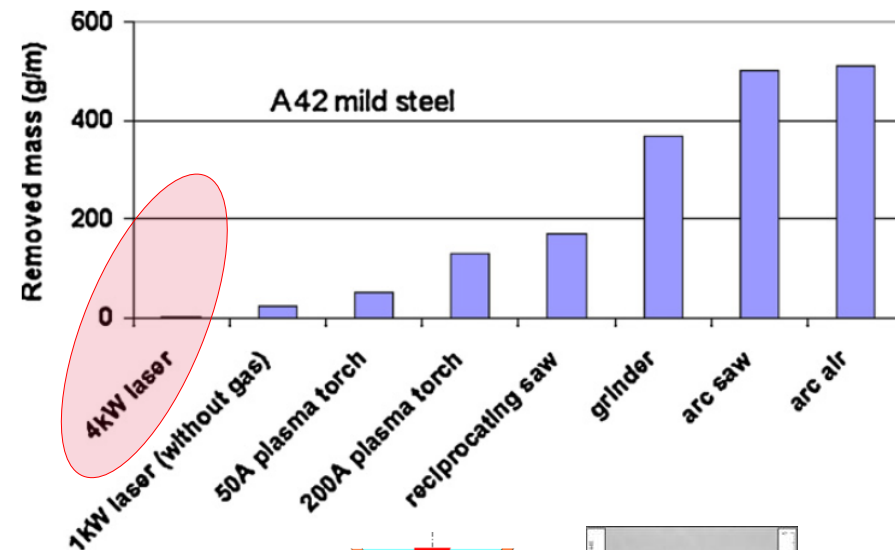
## Comparaison de différents procédés de découpe

G. Pilot et al. / Nuclear Engineering and Design 238 (2008) 2124–2134

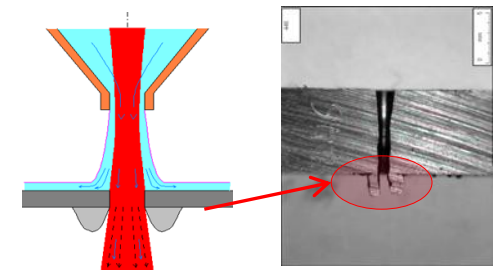
Masse d'aérosols entraînés dans la ventilation



Perte de masse de la pièce découpée par unité de longueur



Dans les conditions de fonctionnement optimales, le laser présente des aérosols plus faibles que la plupart des autres procédés thermiques de découpe et permet également de limiter la production de scories (perte de masse de la pièce découpée) dont une grande partie reste sur la face arrière de la pièce découpée.



## Découpe en air

### Les contraintes spécifiques des chantiers de démantèlement

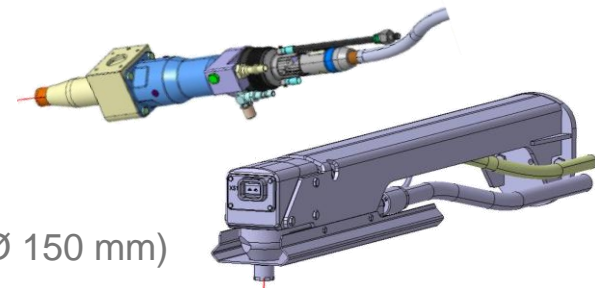
- refroidissement par air
- sécurité thermique intégrée
- pas de zone de rétention (décontamination)
- Tenue thermique (choix de matériaux)
- robuste
- facilité de positionnement



### Développement de 2 têtes de découpes en air

→ Droite (Pmax 14 kW)

→ Coudée (Pmax 8 kW Ø 150 mm)



### Moyen d'essais

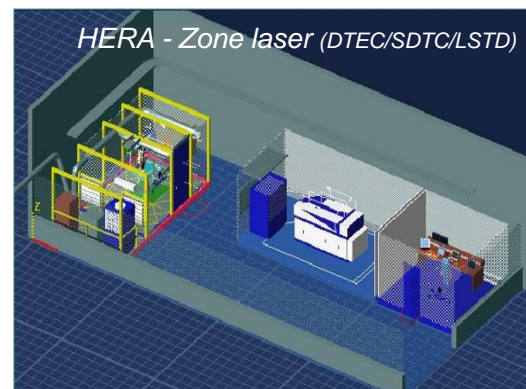


DELIA (DANS/DM2S/SEMT/LTA)

#### LTA (Saclay)

Laser 8 kW

- Mise au point du prototype
- Industrialisation (ARO)
- Test et validation des performances



HERA - Zone laser (DTEC/SDTC/LSTD)

#### LSTD (Marcoule)

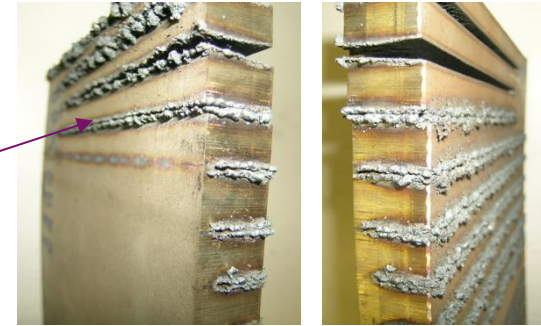
Laser 6 kW

- Mise en situation opérationnelle
- Qualification du procédé
- Assistance au chantier

## Bilan des essais de la découpe en air

### Capacité de découpe (acier 316L)

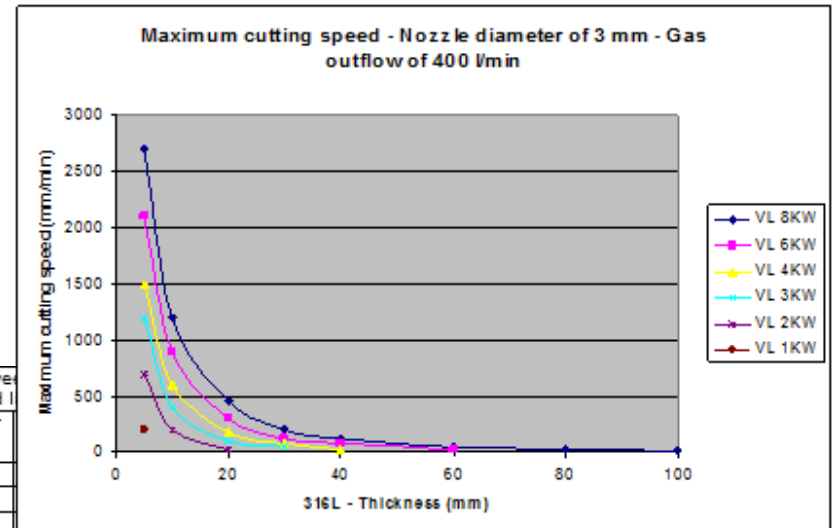
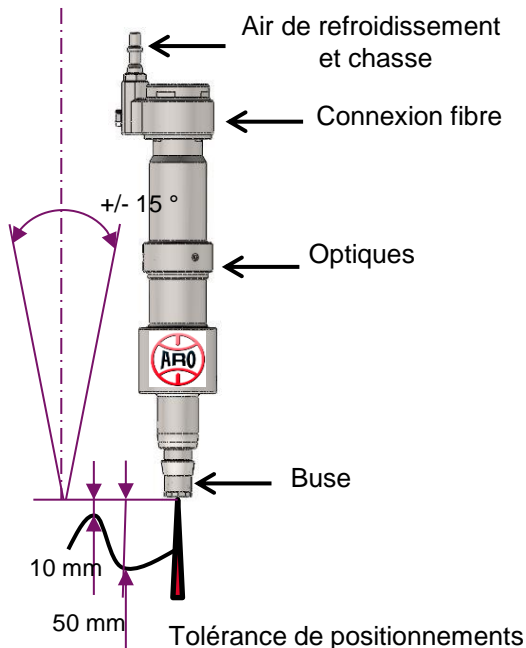
- Départ bord de tôle : 100 mm (vit. lente) → ≈ 1 cm/kW
- ⚠ Perçage pleine tôle : < 30 mm



### Vitesses Limites

→ réglage chantier  $V = VL/2$

### Tolérances de positionnement



316L austenitic steel - Distance H between mm - Gas Outflow of 400l/min > Speed l

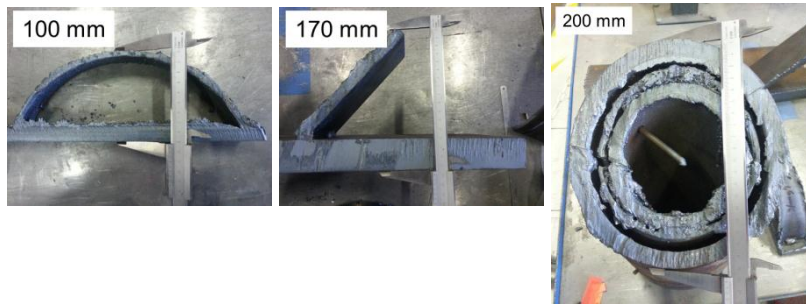
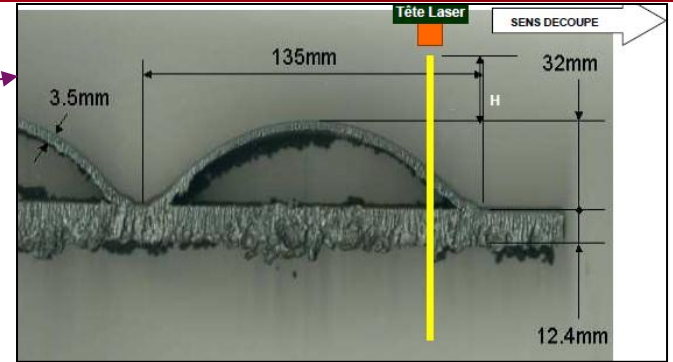
Plate thickness (mm)	VL (mm/min) - Laser power of 8KW	VL (mm/min) - Laser power of 6KW	VL (mm/min) - Laser power of 4KW	VL (mm/min) - Laser power of 3KW	VL (mm/min) - Laser power of 2KW	VL (mm/min) - Laser power of 1KW
100	7,5					
80	20					
60	40	20				
40	125	75	20			
30	200	125	75	40		
20	450	300	175	100	20	
10	1200	900	600	400	200	
5	2700	2100	1500	1200	700	200

(données DANS/DM2S/SEMT/LTA)

## Bilan des essais de la découpe en air

### Capacité de découpe de géométries complexes

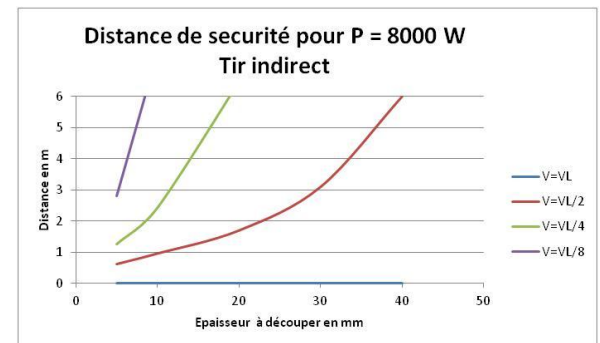
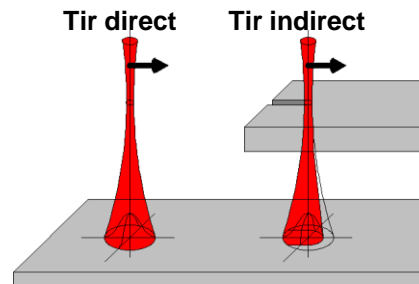
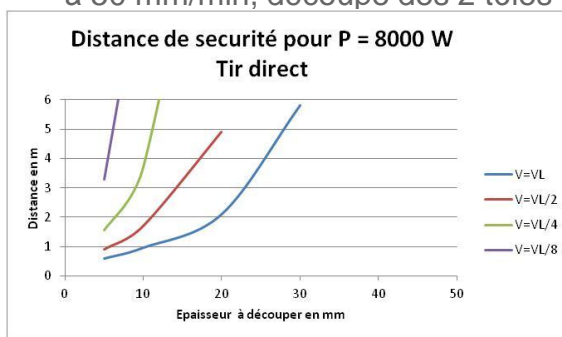
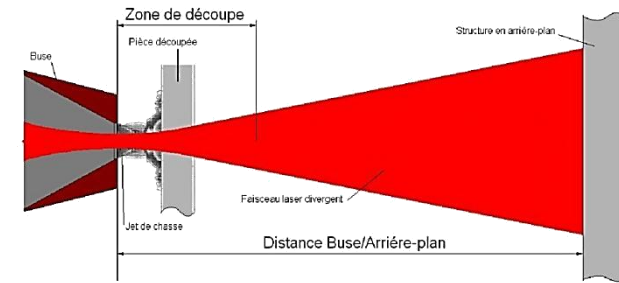
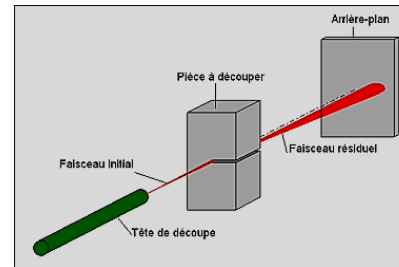
- Evaporateur (Uranus) P=4 kW ; V=300mm/min
- ≈ échantillons à P=6 kW (à vitesse variable)



### Découpe double épaisseur

échantillon : 2 tôles 5 mm espacées de 40 mm (P= 4 kW)

- à 600 mm/min, découpe 1<sup>ère</sup> tôle
- à 50 mm/min, découpe des 2 tôles



### Impact de l'énergie laser (résiduelle) sur les structures en arrière plan

→ Utilitaire interface Windows – modèle Cast3M

## Découpe sous eau

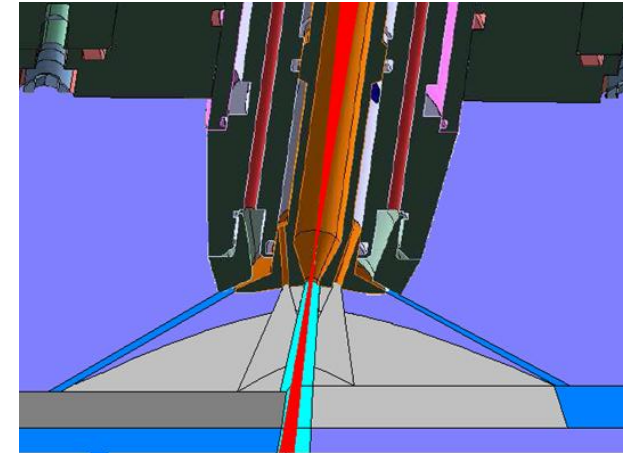
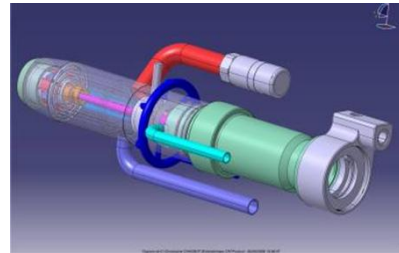
### La contrainte supplémentaire : Former une zone sèche

→ Optimisation des paramètres

### Expérimentation et simulation

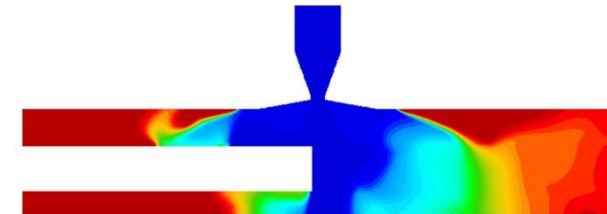
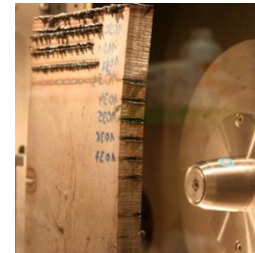
→ Tolérance de positionnement réduite

→ Pas de découpe double épaisseur



### Capacité de découpe (acier 316L)

- Ep 20 mm sous 50 cm H<sub>2</sub>O ≡ Ep 20 mm en air
- Ep 20 mm sous 4 m H<sub>2</sub>O ≡ à Vitesse/2 en air
- Ep 40 mm sous 50 cm H<sub>2</sub>O → limite sous eau ⚠



### Caractériser la production d'aérosol

- Aérosol gain = 75 sous 50 cm H<sub>2</sub>O et 400 sous 4 m H<sub>2</sub>O

### Poursuivre la R&D

- Modification Délia → Délia 2 (mise en pression jusqu'à 5 bars)
- Prototypes têtes et ombilics immergés
- Industrialisation têtes
- Qualification du procédé sous eau → fosse sous HERA

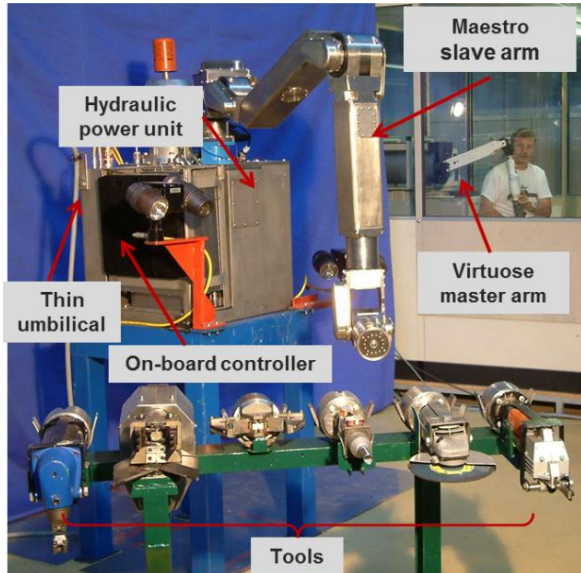


# LA DÉCOUPE ET SA MISE EN ŒUVRE EN ROBOTIQUE : LE PROCÉDÉ DE MISE EN ŒUVRE À DISTANCE MAESTRO

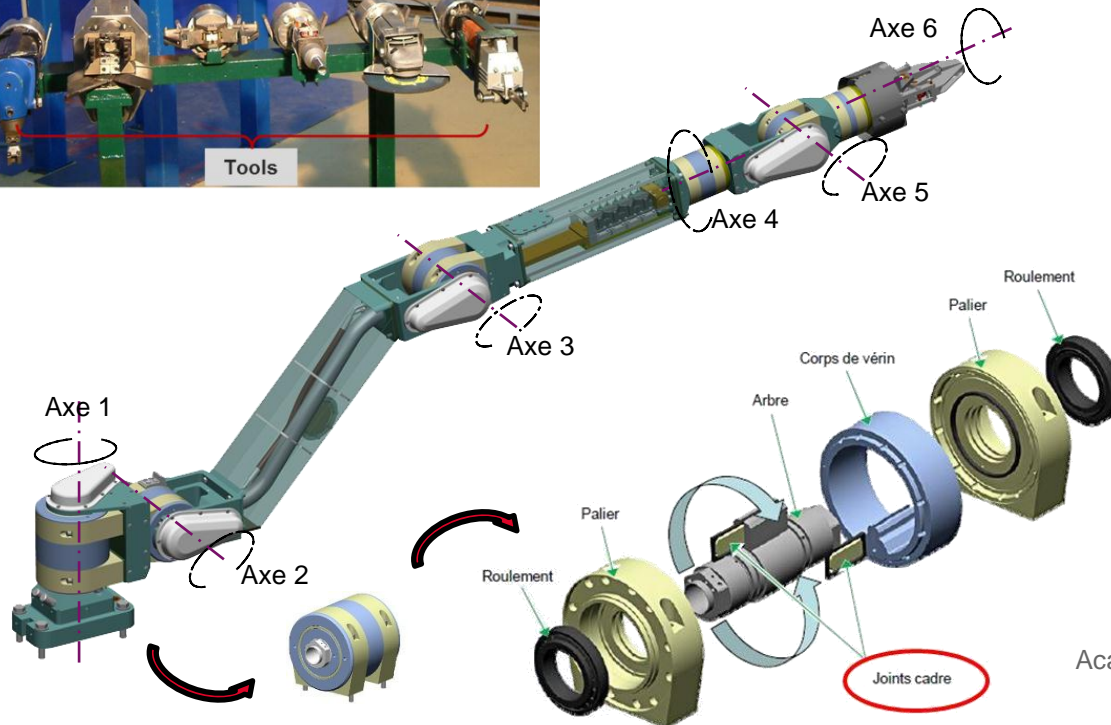
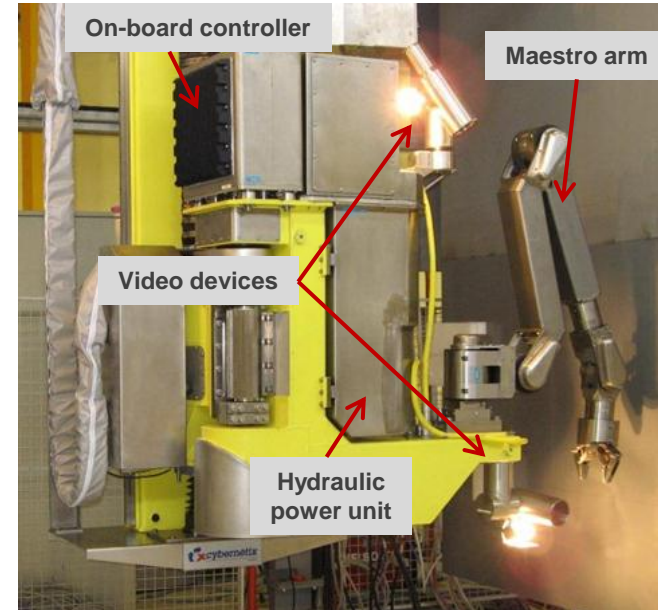
Du prototype de recherche



...



... au produit industriel



## Système MAESTRO

- Bras esclave hydraulique en titane capacité 60 kg à 2 m<sup>3</sup>
- Répétabilité unidirectionnelle 1mm
- Actionneurs rotatifs, poignet concourant avec changeur d'outil (pas d'ombilic outil électriques externe)
- Système modulaire durci 10 k Gray et décontaminable
- Sensibilité effort 2 kg poignet, 10 kg grands axes, ratio maître/esclave effort 1/15<sup>ème</sup>
- Centrale hydraulique embarquée à double enveloppe avec fluide résistant au feu
- Ergonomie poste de pilotage (mode « M/E » à commande cartésienne, mode « robotique » avec apprentissage de trajectoire en mode M/E, Blocage DDL, compensation poids outil, mode « dégradé » à commande articulaire ...)

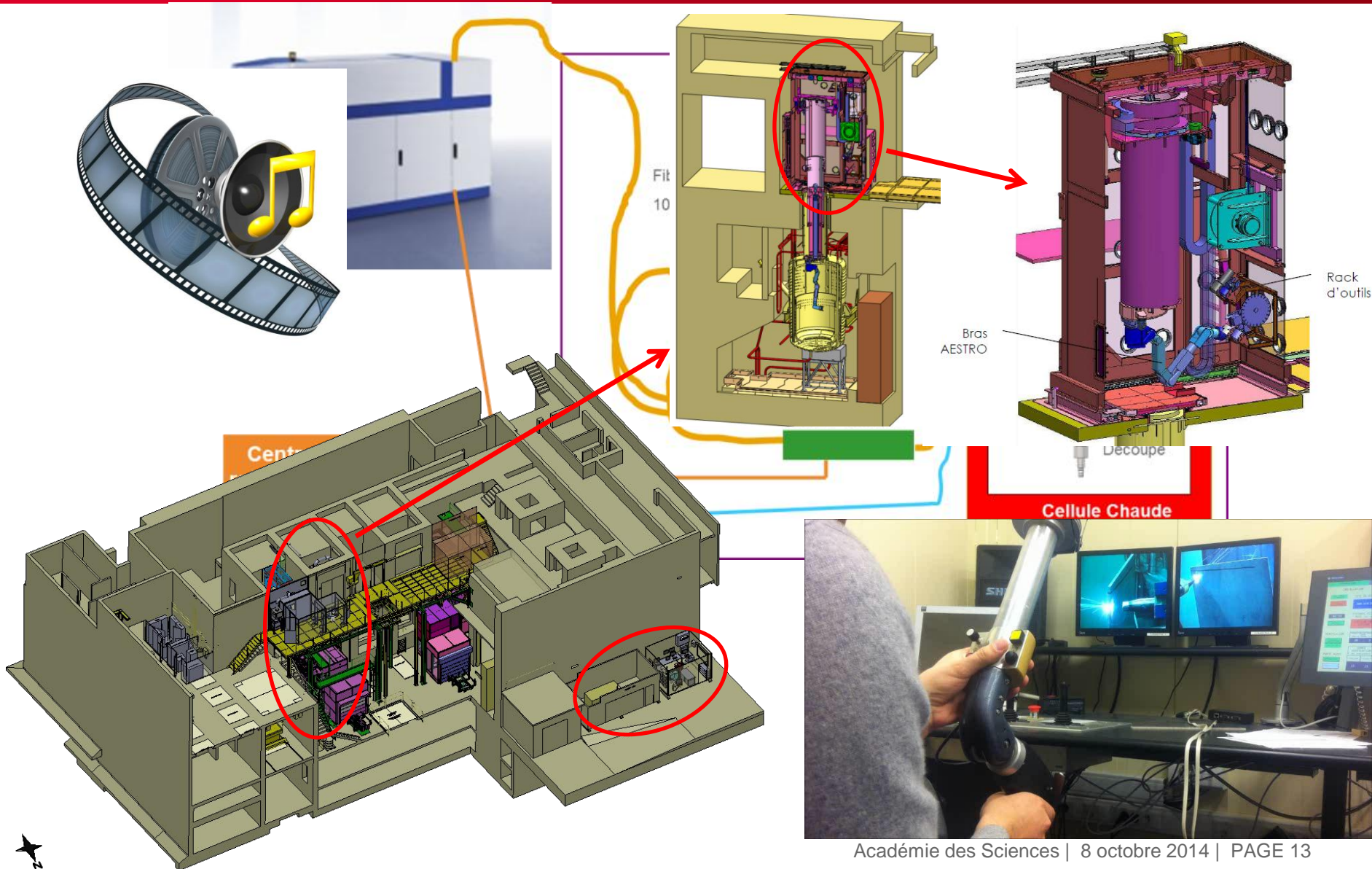
## Fiabilité/maintenabilité (disponibilité)

- Par le retour d'effort, réduction des chocs et vibrations sur le manipulateur
- Essai d'endurance de plus de 1200 heures
- Modularité pour diminuer les temps de maintenances → Disponibilité attendue sur chantier de 80 %
- REX utilisation sur BR3, robot d'intervention pour KHG, intervention en réacteur pour Hitachi

## Productivité

- Réduction du facteur humain par l'ergonomie du contrôle-commande
- Permet l'usage d'outils électriques plus performants (ex: grignoteuse)
- En condition d'essai en inactif nous avons obtenu entre de 40 à 60 kg/jour de déchets découpés/conditionnés/rangés en poubelle

# LA DÉCOUPE ET SA MISE EN ŒUVRE EN ROBOTIQUE : LA DÉCOUPE PAR LASER EN CONDITION OPÉRATIONNELLE





## 2<sup>ème</sup> PARTIE

# GÉNÉRATION DE TRAJECTOIRES À PARTIR D'UN NUAGE DE POINTS

## Contexte

- Lors d'opérations de démantèlement des installations nucléaires, le mode trajectoire programmée des robots est peu utilisé, du fait de la méconnaissance de l'environnement dans lequel le robot doit évoluer

## Objectifs

- Simplifier l'utilisation du robot en mode trajectoire programmée dans un environnement inconnu initialement  
Démontrer la faisabilité de l'utilisation du scan laser 3D en condition d'opération de démantèlement  
Démontrer la faisabilité de l'ensemble des opérations nécessaires à la génération de trajectoires robots à partir du nuage de points, et à terme réaliser ces opérations en « dynamique »
- Améliorer/simplifier la réalisation de tâches aujourd'hui longues, répétitives et/ou précises

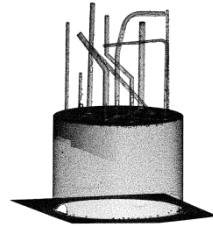
## ► Les solutions aujourd'hui :

- ◆ **Piloter le robot en mode « maître-esclave »**
- ◆ **L'utilisation des robots avec trajectoires programmées est réduite aux zones bien connues, très peu dans les zones de démantèlements:**
  - ◆ installations anciennes, pas de TQC,
  - ◆ environnement qui évolue
- ◆ **Gestion des collisions « à vue »**

## ► A terme :

- ◆ **Un opérateur sera en mesure de programmer des trajectoires à partir d'un scan 3D**
- ◆ **Les trajectoires seront validées par la sûreté/sécurité**
- ◆ **Accélérer la trajectoires d'approche des zones de travail**
- ◆ **Augmenter la durée de vie des outils de découpe**
  - Contrôle de trajectoires, d'inclinaison, effort, ...

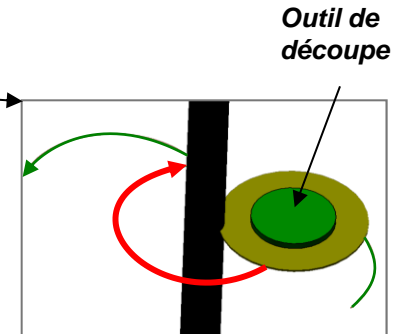
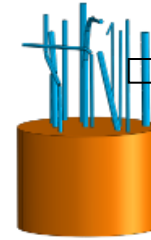
# GÉNÉRATION DE TRAJECTOIRES À PARTIR D'UN NUAGE DE POINTS : PRINCIPES TECHNIQUES



Investigation,  
Scan 3D  
→ Nuage de points

modèle  
surfaceutique 3D

Définitions de  
trajectoires de  
découpe



*Phase préparation*

*Phase de réalisation*

Calage de la  
position Robot  
→ Scan 3D avec le  
robot en cellule

Trajectoires de  
découpe

Évolution de  
l'environnement ?

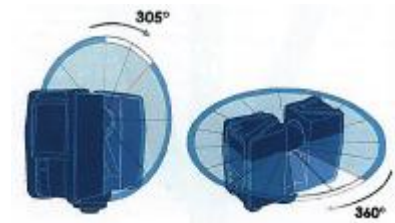
scan 3D  
Mise à jour du 3D

Nouvelles  
trajectoires





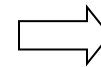
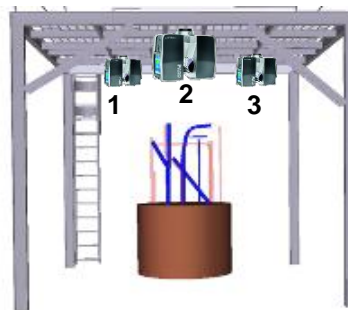
- ▶ Scanner la cellule, si possible avec différents points de vue
- ▶ Fusionner les nuages de points
- ▶ Extraire du nuage de points global les régions d'intérêt
  - ◆ Cuves / évaporateurs et tuyauteries
  - ◆ Sol, murs, structures



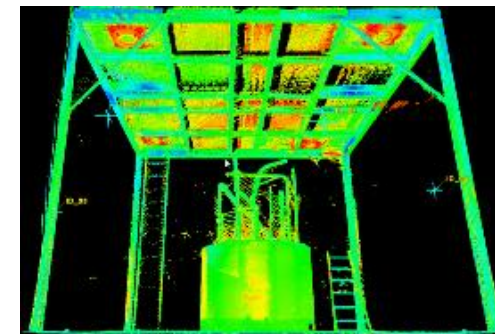
Environnement réel

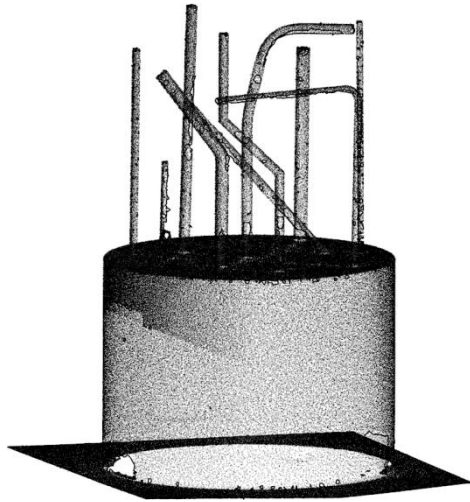


Scans 3D

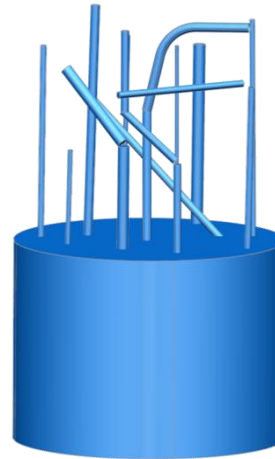


Nuage de point de la cellule





Nuage de point, fichier brut



## ► Modèle CAO

- ◆ Reconnaissance des primitives

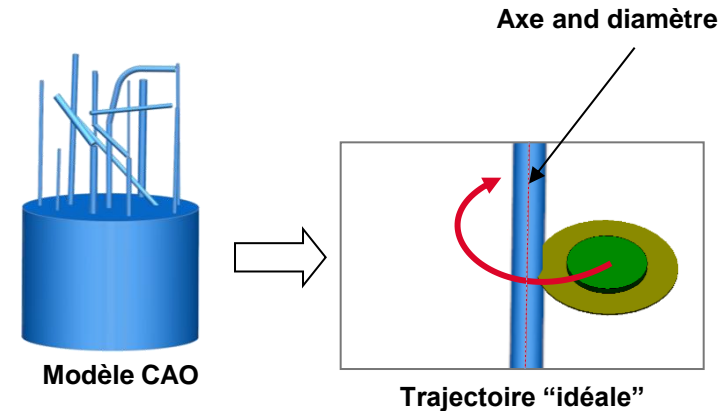


## ► Maillage en 3D

- ◆ Génération de polygones d'approximation de surface



- ▶ Les trajectoires sont construites à l'aide des éléments remarquables du modèle CAO (axes, plans...) :  
*Ex : Pour créer une trajectoire outil circulaire parfaite autour d'une cuve, son axe et diamètre sont nécessaires*
- ▶ Génération de trajectoires avec les outils métiers FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) hors ligne



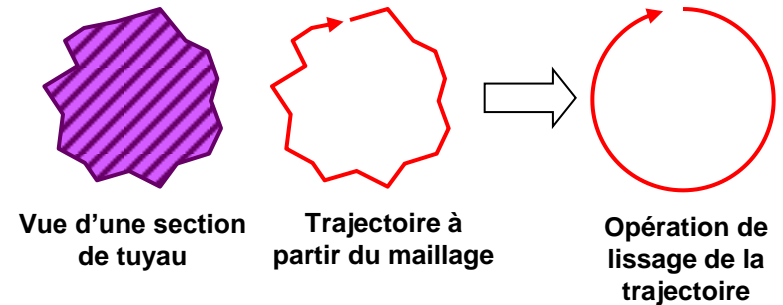
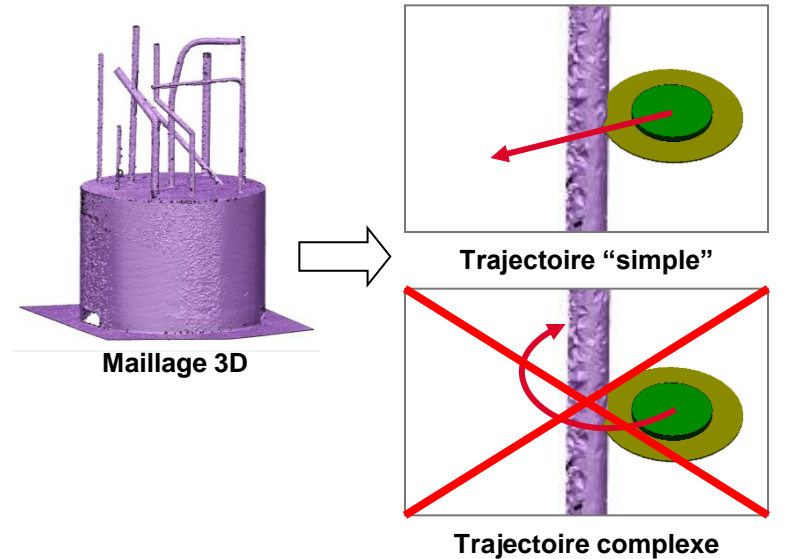
→ Ca fonctionne ...

→ ... mais ce n'est pas très « dynamique »,  
il faut compter 1,5 jours pour réaliser le  
modèle CAO simple



- ▶ A ce stade, seules les trajectoires simples peuvent être générées (trajectoires rectilignes)
- ▶ Les trajectoires complexes ne sont pas réalisables :
  - ◆ Le « bruit » sur la maille entraîne un bruit sur la trajectoire
  - ◆ L'outil de découpe nécessite une trajectoire « lissée »
- ▶ Les besoins en calculs augmentent exponentiellement avec les dimensions de la scène

→ Des développements sont encore nécessaires (logiciels, IHM, tests de découpe, ...) pour utiliser directement le maillage 3D pour générer les trajectoires

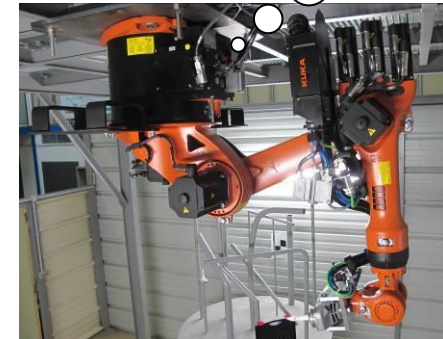
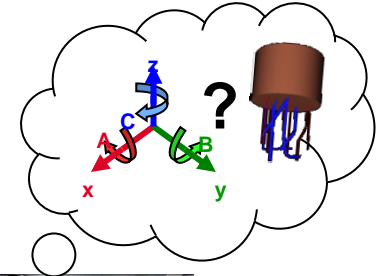
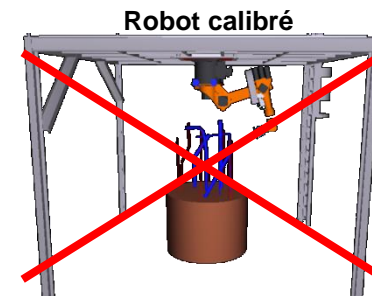
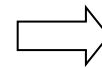
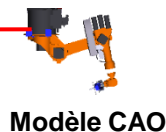
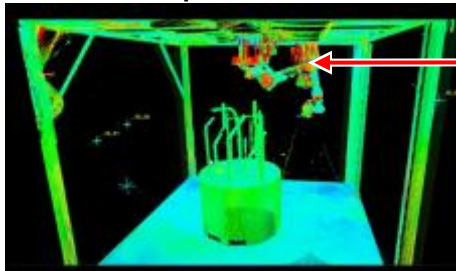




## ► Calage de la position du robot à partir du modèle CAO du robot

- ◆ Nouveau scan 3D de la cellule lorsque le robot est positionné en cellule
- ◆ Mise en correspondance du modèle avec le nuage de point
- ◆ Erreur lors des premiers essais : l'erreur de position est de presque 30 mm (X,Y et orientation)
- Les surfaces externes du robot ne sont pas dans le modèle mathématique du robot (carter plastiques, surfaces brutes de fonderie, ...)
- Le modèle CAO fourni n'est pas nécessairement à jour et peut évoluer

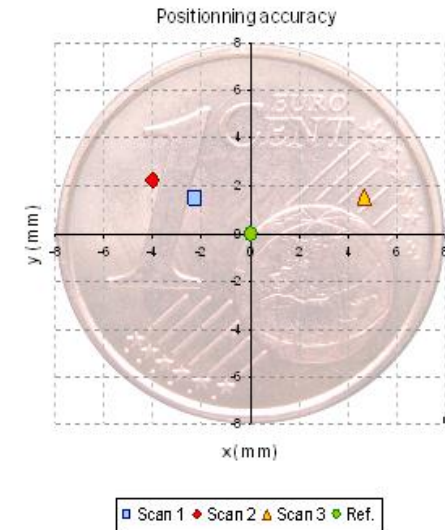
Nouveau scan pour calibration du robot



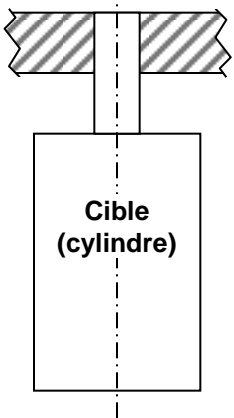


## ► Calage robot avec cibles

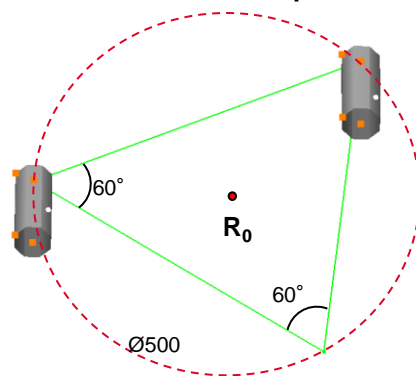
- ◆ Positionner des cibles dans les trous de positionnement (dédié à cette fonction dans la base du robot)
- ◆ Nouveau scan 3D avec le robot+cibles
- ◆ Mettre en correspondance les cibles et le nuage de point
- ◆ La précision du calage robot est alors <4mm (en X et Y)



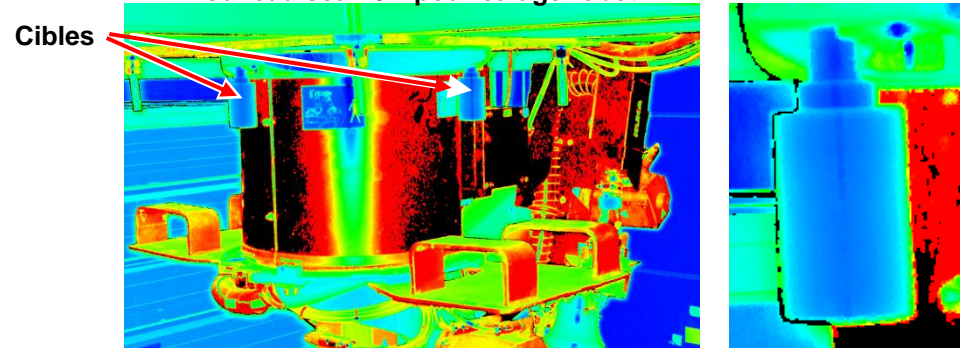
Trous repérés dans la base (H7)



Trous de positionnement dans le modèle mathématique du robot



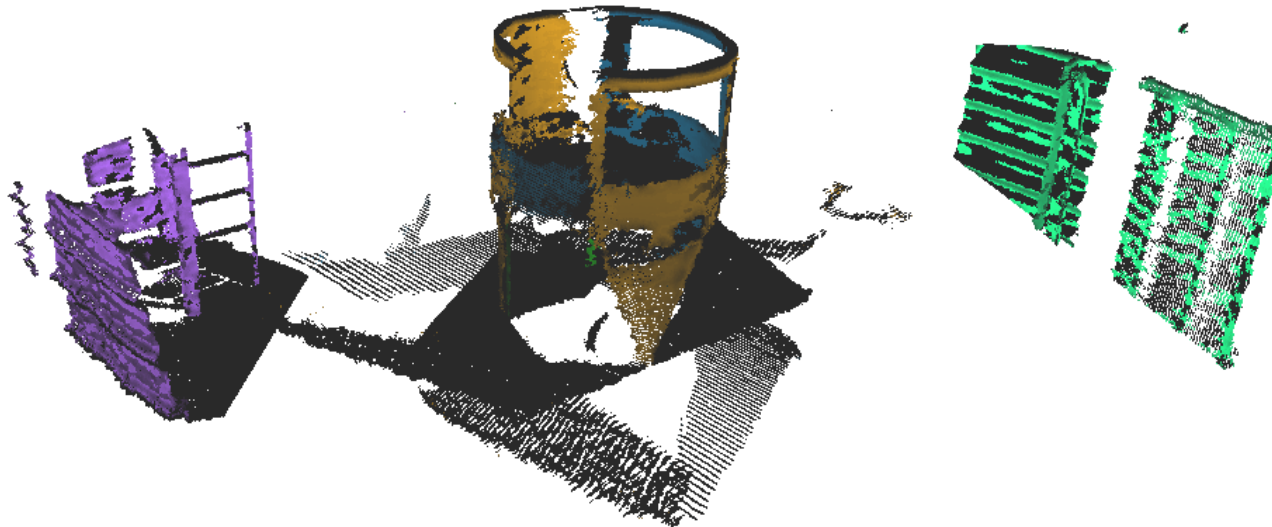
Nouveau scan 3D pour calage robot



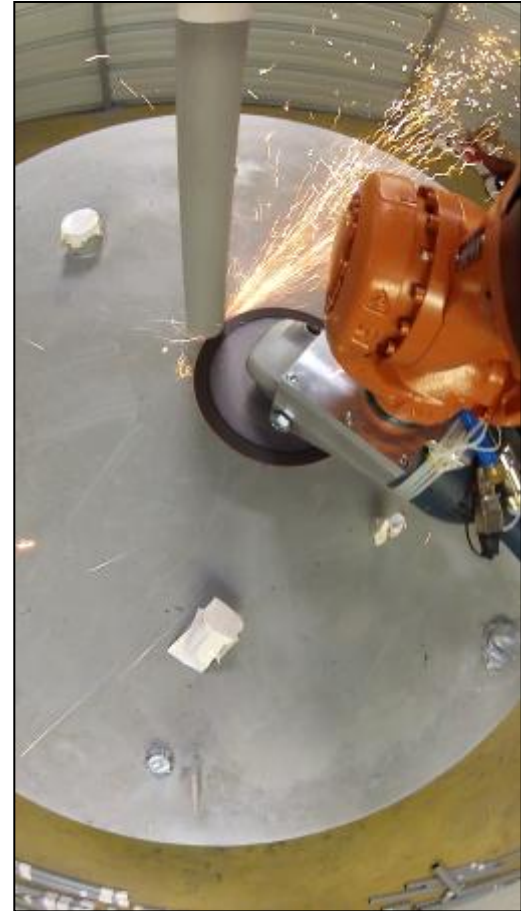
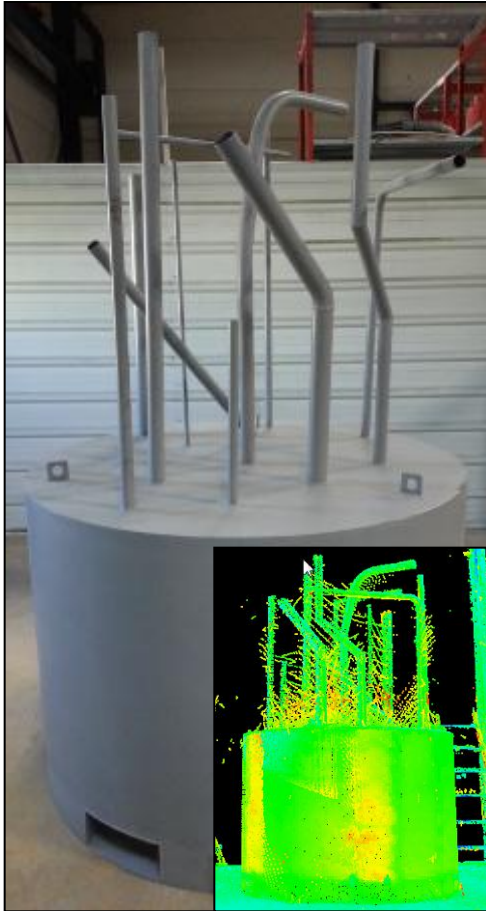


## ► Mise à jour du modèle 3D avec une Kinect :

- ◆ **Prise « d'instantanés » avec la kinect :**
  - cartes de profondeur (640 x 480 points, infos distance)
- ◆ **Transforme la carte de profondeur en nuage de point :**
  - les informations contenues dans la carte de profondeur 2D permettent de construire un nuage de point 3D
- ◆ **Transformation de repère du nuage de point vers le repère de l'outil**
  - repositionnement du nuage de point en 3D à l'aide de la connaissance de positions robot
- ◆ **Fusion de tous les nuages de points**
  - Nuage de point complet dans le repère du robot



# GÉNÉRATION DE TRAJECTOIRES À PARTIR D'UN NUAGE DE POINTS : DÉCOUPE DE TUYAUX





- ▶ **Les technologies existantes permettent d'envisager l'usage d'un robot pour des opérations d'interventions (découpe) dans un environnement non connu (cellule chimie Marcoule, LH)**
- ▶ **La mise en œuvre des matériels ou outils de reconstruction / simulation (scan laser, logiciels de reconstruction 3D, CAO...) sont aujourd'hui matures pour un usage dans le nucléaire**
- ▶ **Des optimisations sont attendues à court terme (1 à 2 ans) pour encore faciliter la programmation de trajectoires robot dans un environnement inconnu au départ (en mode dynamique par exemple)**
- ▶ **A moyen terme, on peut envisager d'avoir une reconstruction quasiment en ligne, limitant encore la phase étude**



## ▶ 2014:

- ☑ Démontrer la faisabilité de toutes les opérations nécessaires à l'élaboration de trajectoires à partir d'un nuage de points (en passant par un modèle CAO)
- ☑ Calage en position du robot à partir du nuage de points
- ☑ Réaliser des essais de découpe en déterminant les trajectoires robot hors ligne à l'aide d'outil d'aide à la fabrication
- ☑ Créer un maillage en dynamique à l'aide d'une Kinect

## ▶ 2015:

- ☐ Générer en dynamique une trajectoire à partir du nuage de points (en utilisant une étape de maillage 3D)
- ☐ Réaliser des essais de découpe en construisant les trajectoires en dynamique
- ☐ Corriger les trajectoires en dynamique à partir du nuage de point pour l'évitement d'obstacles
- ☐ Usinage adaptatif

## ▶ > 2015:

- ☐ Usinage adaptatif
- ☐ Développement logiciels pour implémenter les solutions logicielles dans une IHM unique...





**MERCI DE VOTRE ATTENTION**