Cahier des charges pour la mise en œuvre d'une solution robotisée destinée au CND multi-physique.

Document complémentaire au fichier « ACTE D'ENGAGEMENT - ANNEXE 1 »

M. Castaings, D. Bernard, A. Viel, P. Mounaix, A. Sommier

5 novembre 2026

Objet de la consultation

Cet appel d'offre s'intègre dans le cadre d'un projet CPER (Contrat de Plan État Région) cofinancé par Bordeaux Métropole et le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Il a pour but de définir les fonctionnalités et certains aspects techniques d'une solution mécatronique, i.e. un système équipé de robots ou autres machines spéciales, permettant des mouvements mécaniques spécifiques avec une précision minimale, intégrant de l'informatique et de l'électronique pour la programmation de ces mouvements, la communication avec des ordinateurs d'acquisitions de signaux, etc…) en vue de permettre les contrôles non destructifs multi-physiques (ultrasons, thermique, terahertz et tomographie X) de pièces (matériaux, structures) — *illustration Figure 1*. Ce système sera installé dans le bâtiment ICNDE-PT (plateau technique du centre d'innovation en Contrôle Non Destructif ou ICNDE pour *Innovation Center for Non-Destructive Evaluation*), dont la livraison est prévue en janvier 2028, sur le site Evering de Mérignac. Le système permettra d'inspecter des pièces de dimensions pouvant atteindre 5 mètres et sera installé dans une enceinte de radioprotection de dimensions intérieures long. 6m x larg. 6m x haut. 5m.

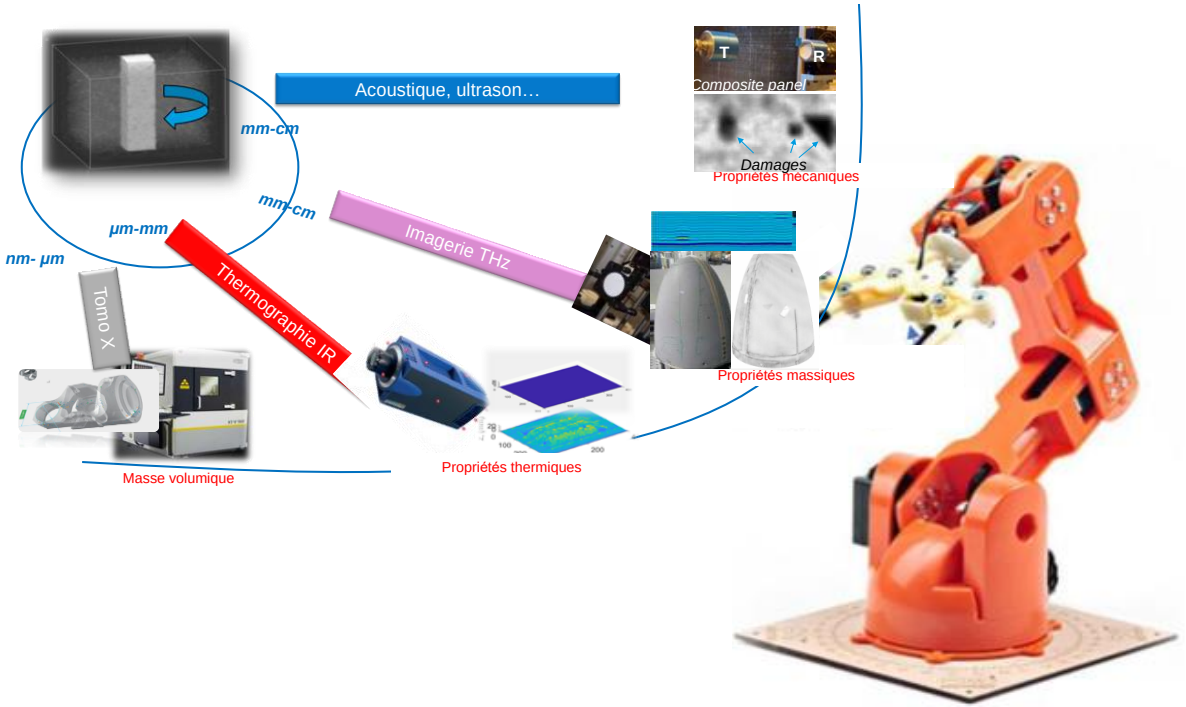


Figure 1 : Schéma de principe global de la réalisation

Objet de la consultation

La consultation ci-décrite nécessite de répondre au besoin d'automatisation du CND via les quatre physiques qui seront embarquées par un système autorisant de nombreux déplacements contrôlés (axes motorisés pour la translation, pour la rotation, glissières, robots…) avec des amplitudes et des précisions adaptées à l'auscultation de petites, moyennes ou grandes pièces (quelques dizaines de centimètres à 5 mètres) et aux formes planes ou courbes, voire cylindriques, pour détecter et imager des défauts de dimensions variables (1mm à plusieurs cm). L'objectif final étant de réaliser une image partielle ou complète des pièces avec des contraintes : (i) de positionnement et mouvement de la (des) source(s) et/ou du (des) capteur(s) par rapport à la surface de la pièce, (ii) de mode de mesure (réflexion ou transmission), (iii) d'orientation et de précision du positionnement dans un repère commun et fixe de l'espace. Dans la suite du document, la solution (objet de cet appel d'offre) sera nommée SolRob pour « solution robotisée ».

Dans les données d'entrée du CDC, on pourra trouver le détail des encombrements, poids… des différentes physiques en annexe. Cependant et globalement, la réponse à cet appel d'offres va s'articuler autour de 4 points principaux :

1. Analyse fonctionnelle, conception et définition de SolRob ;
2. Réalisation et intégration de SolRob ;
3. Réalisation d'un logiciel de pilotage, de contrôle et d'optimisation des trajectoires, d'exécution des mouvements, en fournissant un signal qui permettra de synchroniser les mouvements de SolRob avec les acquisitions par les systèmes de mesures (la partie acquisition et traitement des mesures ne fait pas partie de la solution demandée ici, seul le signal de synchronisation pour chaque nouvelle position est demandé). Le logiciel devra présenter une ergonomie et une convivialité suffisantes pour qu'il puisse être utilisé par divers types d'utilisateurs initiés ou pas (chercheurs, industriels, stagiaires).
4. Livraison, validation et formation.

La solution attendue comporte une partie principale dite solution de base avec des fonctionnalités minimales obligatoires (pages estampillées 1) et une partie fractionnée avec des fonctionnalités complémentaires, susceptibles d'être commandées ultérieurement : pages estampillées 2 ou 3 selon le degré d'importance (de priorité) de ces fonctionnalités. La solution de base sera livrée en deux parties :

a) La 1ère livraison, attendue au plus tard 14 mois après la notification du marché, devra comporter l'intégralité des équipements et permettre un fonctionnement avec des mouvements élémentaires, notés 1a. Elle inclura la mise en service, la formation des utilisateurs et les échanges nécessaires avec le fournisseur *RX-Solutions* pour que les appareils de mesures RX (source, imageur, câbles, ordinateur d'acquisition…) soient opérationnels avec SolRob ;
b) La 2ème livraison, attendue au plus tard 22 mois après la notification du marché, devra comporter les éléments de la solution de base qui n'auront pas été encore livrés, notés 1b.

La page suivante liste les fonctionnalités de catégories 1a, 1b, 2 et 3.

Table des matières

- **Liste des fonctionnalités (mouvements et précisions) souhaitées classées en 3 catégories** **5**

  - catégorie 1a : partie de la solution de base avec livraison au plus tard 14 mois après la notification du marché ;

  - catégorie 1b : partie de la solution de base avec livraison au plus tard 22 mois après la notification du marché ;

  - catégorie 2 : partie fractionnée de priorité élevée avec livraison en 2028 ou plus tard ;

  - catégorie 3 : partie fractionnée avec livraison en 2028 ou plus tard ;

- **Solution logicielle / Campagne de mesures** 6-13
- **Positionnements et mouvements requis pour les expérimentations ultrasonores (US)** 14-20
- **Positionnements et mouvements requis pour les expérimentations tera-hertz (THz)** 21-23
- **Positionnements et mouvements requis pour les expérimentations infra-rouge (IR)** 24-27
- **Positionnements et mouvements requis pour les expérimentations de tomographie X (RX)** 28-34
- **Eléments d'informations sur le porte-pièces** 35-39
- **Précisions augmentées (partie fractionnée)** 40

Fournitures de catégories 1a, 1b, 2 et 3.

Fournitures de catégorie 1a : les mouvements listés ci-après et tous les équipements nécessaires associés :
- USTBNI : UltraSound Transmission Bulk waves Normal Incidence ;
- THz-R : Tera-Hertz wave Reflection ; *idem que USTBNI avec un effecteur différent et un seul robot utilisé*
- FIRR : Flash Infra-Rouge Reflection ; *idem que USRGT avec un effecteur différent*
- FIRT : Flash Infra-Rouge Transmission ; *idem que USTBNI avec deux effecteurs différents*
- TXS : Tomographie Standard à la hauteur H ; *mouvements spécifiques décrits dans le document*

Fournitures de catégorie 1b : les mouvements listés ci-après et tous les équipements nécessaires associés :
- TXH : Tomographie hélicoïdale ; *mouvements spécifiques décrits dans le document*
- RXL : Rayons X Laminographie ; *mouvements spécifiques décrits dans le document*
- USRGT : UltraSound Reflection Guided waves Tomographie ; *idem que USTBNI avec un effecteur différent et un seul robot utilisé*
- THz-RT : Tera-Hertz wave Reflection Tomographie ; *idem que USRGT avec un effecteur différent*
- FIRRT : Flash Infra-Rouge Reflection Tomographie ; *idem que USRGT avec un effecteur différent*

Fournitures de catégorie 2 : scan optique & numérisation 3D de la pièce, avec tous les équipements nécessaires associés :
Fournir l'ensemble des équipements de catégorie 2 : un moyen de scan optique pour numériser en 3D la pièce à contrôler, plane ou de forme complexe, et un logiciel qui reconstruit sa géométrie en fichier .obj. Ce fichier sert de référence pour programmer les trajectoires des robots et recaler les mesures CND.

Fournitures de catégorie 3 : les mouvements listés ci-après et tous les équipements nécessaires associés :
- USTBOI : UltraSound Transmission Bulk waves Oblique Incidence.
- USTG : UltraSound Transmission Guided waves.
- USRG : UltraSound Reflection Guided waves.
- USTGVD : UltraSound Transmission Guided waves with Variable Distance between emitter and receiver.

Fourniture de catégorie 3 : tous les équipements nécessaires à la fonctionnalité (augmentation de la précision) de catégorie 3 ci-après :
Mettre en place une solution de métrologie qui mesure et corrige en temps réel la position de deux robots porteurs de capteurs CND (ultrasons, THz, RX), l'un par rapport à l'autre et par rapport à une pièce plane ou complexe. La précision visée est de ±0.1 mm (X, Y, Z) et ±0.1° (θ, ϕ), démontrée par un bilan d'incertitude.

Solution logicielle / Campagne de mesures

A propos du logiciel de pilotage :

- Il doit permettre le choix de différentes techniques de mesure (US, Thermo, THz)
- Chaque technique impose ses contraintes de configuration et d'encombrement sur le calcul des trajectoires.
- Si la pièce à inspecter n'a pas bougé, il faut avoir la possibilité de reloader le scan existant.
- Il faut pouvoir charger des paramètres initiaux pour une manipe (position des bras robots+capteur vis à vis de la pièce, vitesse, type de scan)
- Fonctionnalités supplémentaires souhaitées pour le logiciel : possibilités d'évolution par ajout de modules par le fournisseur ou par l'utilisateur (préciser le niveau d'ouverture du logiciel).

A propos de la précision :

- Mesure = ensemble d'acquisitions le long d'une trajectoire
- la cartographie finale des propriétés physiques de l'échantillon est effectuée par l'ICNDE. Lors d'une mesure (ensemble d'acquisitions le long d'une trajectoire), un trig est envoyé pour chaque position où l'on souhaite effectuer une acquisition. La liste des positions est ensuite communiquée de l'OR à l'OA. La précision de la cartographie est directement liée à la précision de cette liste de position.
- En configuration C Scan, la précision d'alignement des robots entre eux, à maintenir pendant les déplacements, devra être inférieure ou égale à ±1.5mm. Une précision meilleure sera un plus.

Solution logicielle / Campagne de mesures

Résumé d'une campagne de manipe

Le déroulement d'une campagne de mesure est détaillé dans les 6 slides ci-après. Toutes les actions de pilotage et d'interaction avec les ordinateurs d'acquisition demandées sont représentées dans un rectangle vert .

Solution logicielle / Scan optique de la pièce / Calibration

Ordinateur ROBOTS (OR)



Logiciel pilotage robots

Scan optique

Avant une mesure physique des propriétés de l'échantillon, il est nécessaire de scanner la pièce via un dispositif optique pour situer l'échantillon dans l'espace et définir les trajectoires d'inspection en fonction des capteurs choisis (US, IR, ou THz). Le rendu obtenu doit être fourni dans un fichier 3D (format .obj).

Calibration

Une fois le scan optique terminé, le fichier 3D doit permettre la calibration des physiques. L'utilisateur doit pouvoir pointer une position sur l'objet à scanner, les robots se mettent alors en position de mesure, en fonction du type de physique choisi. L'utilisateur a ensuite la main pour ajuster finement les paramètres robot (positions x,y,z, et 3 rotations) afin optimiser le signal physique (US, IR, THz) obtenu.

Solution logicielle / Protocoles de communication – US, IR, THz

1a

Ordinateur ROBOTS (OR)



Logiciel pilotage robots

- réaliser le scan optique de la pièce sous forme obj/stl
- transférer ce fichier à l'OA
- accepter un fichier de configuration pour pouvoir reproduire une mesure
- calculer les trajectoires des robots
- pouvoir trigger les appareils d'acquisition soit :
  - via un trig logiciel en UDP
  - via un trig électrique type TTL

échange des données
fichiers de configuration,
Trig

Ordinateur ACQUISITION (OA)



Logiciel pilotage instrumentation physique (US, IR, THz)

Acquisition des données

Stockage des données

Définition des fichiers de configuration

Solution logicielle / Protocoles de communication - RX

1a

Ordinateur ROBOTS (OR)



Logiciel pilotage robots

Pas de scan optique
Boucle de rétroaction entre
OR RX A et OR (via API RX)

échange des données
fichiers de configuration

Ordinateur
ACQUISITION RX (O RX A)



Logiciel pilotage instrumentation physique (RX)

- Acquisition image
- Donne les instructions de déplacement aux robots

fichiers de configuration

Ordinateur ACQUISITION (OA)



ICNDE Acquisitions

Lance le processus

Campagnes de mesures ICNDE

Contexte

Deux applications : ICNDE_Acquisitions et ICNDE_Robots ;

Deux ordinateurs : Ordinateur d'acquisition (OA) et ordinateur de pilotage des robots (OR) ;

Chaque application fonctionne sur un ordinateur : ICNDE_Acquisitions sur OA et ICNDE_Robots sur OR ;

Les applications doivent échanger des informations sous différents formats au cours d'une campagne de mesure ;

Une campagne de mesure est toujours initiée par ICNDE_Acquisitions ;

Dans le tableau qui suit, les flèches représentent les échanges de l'OA vers l'OR ou inversement. Chaque échange a un numéro et une description plus précise est données à la suite du tableau.

Campagne de type A

1a

ICNDE_Acquisitions sur OA	ICNDE_Robots sur OR
Démarrage de l'application ICNDE_Acquisitions	
Création du fichier GEOM associé à l'étude	
Création de MD2 pour le scan 3D (mesure type GEOM)	
-1- ICNDE_Acquisitions démarrée →	Démarrage du système
	Scan de la pièce
	Reconstruction de la surface
-2- Lecture des paramètres du scan ←	Définition des paramètres caractéristiques du scan
-3- Lecture des données du scan ←	Transfert des données du scan (fichier .obj)
Validation des données	
Faire une mesure de type MES	
-4- Transfert des paramètres pour MES →	*Définition des paramètres métadonnées*
	Chargement des métadonnées_CA
-5- Lancement application physique possible ←	Calibration des physiques possible
Lancement application physique (US/IR/THz)	
	Déplacement des bras robots
Analyse des données	
Ajustement des paramètres d'acquisition	Ajustement des paramètres géométriques
Tant que les paramètres ne sont pas validés continuer	
-6- Fin du calibrage →	*Lancement mesure*
	Paramétrer la trajectoire
	Simulation puis validation de la trajectoire
-7- Lecture des données de la trajectoire ←	Transfert des données de la trajectoire
Lancement application physique (US/IR/THz)	
-8- Débuter la série de mesures →	*Démarrer le déplacement des robots*

Campagne de type A

		Déplacement des bras robots	
		Tant que la trajectoire est incomplète	
-9-	Mesure possible à la position des robots	←	Robots à la position de mesure
	Faire une mesure		
-10-	Mesure terminée	→	Robots à la position suivante
		Trajectoire complète	
-11-	Série de mesures terminée	←	Fin de la série de mesures
-12-	Lecture des positions de mesure	←	Transfert des positions de mesure
	Il faudra affiner cette étape pour le cas de déplacement continu		
	Validation des données		
Fin ou faire une nouvelle mesure de type MES			

Positionnements et mouvements requis pour les expérimentations ultrasonores (US)

1a

Pour toutes les expériences décrites dans cette partie, chaque émetteur (E) ou récepteur (R) à ultrasons doit :

- Maintenir une distance constante, avec une précision maximale de ±1.5 mm, par rapport à la surface de la pièce qu'il pointe ;

- Garder une orientation constante, avec une précision maximale de ±1 degré, par rapport à la normale locale à la pièce, c'est-à-dire la normale au niveau de la surface pointée.

Chaque transducteur (émetteur ou récepteur) pèse moins de 500g, mesure entre 40 et 150 mm de long avec un diamètre externe compris entre 30 et 60mm. Certains transducteurs sont rectangulaires de dimension L, ℓ, p = 80, 30, 50mm. Tous les transducteurs sont équipés d'une connexion arrière UHF qui permet de les visser sur une tige UHF de diamètre 18.7mm et longueur 150 à 300 mm (disponibles en plusieurs longueurs pour faciliter le positionnement), qui permet le maintien sur les bras du SolRob.

Les plus petites valeurs de précisions sont souhaitables, et dans tous les cas inférieures à ± 1,5mm.

Manip. US n°1

1a

Nom expérience :

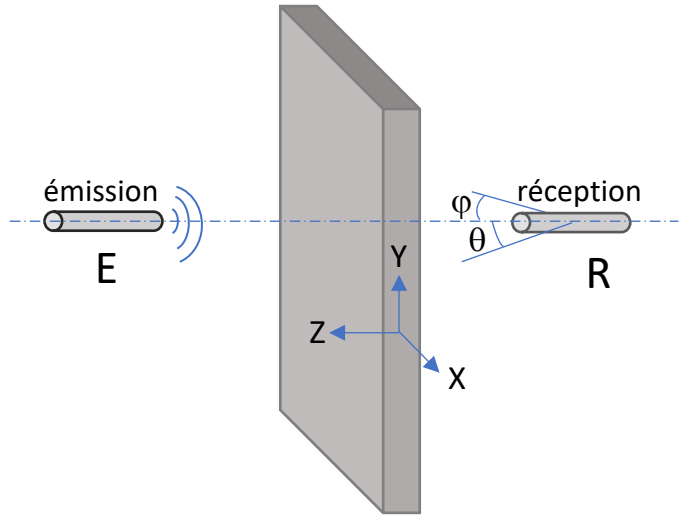
USTBNI : UltraSound Transmission Bulk waves Normal Incidence

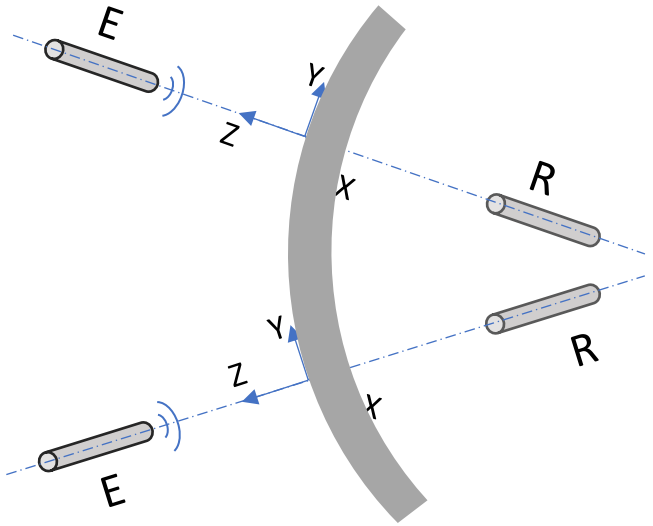
Infos sur la trajectoire associée :

- Les transducteurs sont disposés de part et d'autre de la pièce à inspecter. Ils sont parfaitement alignés, i.e. ±1.5mm suivant X et Y, et ±1° pour, i.e. ±1.5mm suivant X et Y, et ±1° pour les angles θ (dans le plan YZ) et φ (dans le plan XZ). L'axe qui relie le centre de ces deux transducteurs est perpendiculaire à la pièce (au moins à la surface de la pièce située du coté de E, si cette pièce n'est pas d'épaisseur constante) et il le reste durant tous les mouvements de l'ensemble E-R, que la pièce soit plane ou courbe (dans ce dernier cas, l'axe de E à R est colinéaire à la normale locale à la surface située du coté de E).

- Chaque transducteur est distant (suivant Z) d'une valeur comprise entre 15mm et 200mm ; cette valeur correspond à la distance entre la face active du transducteur et la surface de la pièce située de son coté.

- Le mouvement et les acquisitions des signaux sont synchronisés :
  - Mode pas à pas : L'utilisateur doit définir la ROI, le pas en X et le pas en Y ; pour chaque nouvelle position de E et R, le SolRob envoie un trigger qui déclenche une mesure ;
  - Mode continu : le système SolRob déplace continûment le couple E-R et envoie un trigger à des intervalles de temps (à définir selon la vitesse, la décélération ou l'accélération) pour déclencher des mesures avec un pas constant suivant X et suivant Y. L'utilisateur doit définir la ROI, la vitesse de déplacement de SolRob (vitesse suivant X et Y en milieu de ROI), le pas en X et le pas en Y. Le système doit calculer les Δt du trigger, qui ne sont pas forcément constants puisque les déplacements de E et R doivent ralentir à l'approche d'un bord de la ROI et ré-accélérer en s'éloignant du bord.





Variante d'US n°1

3

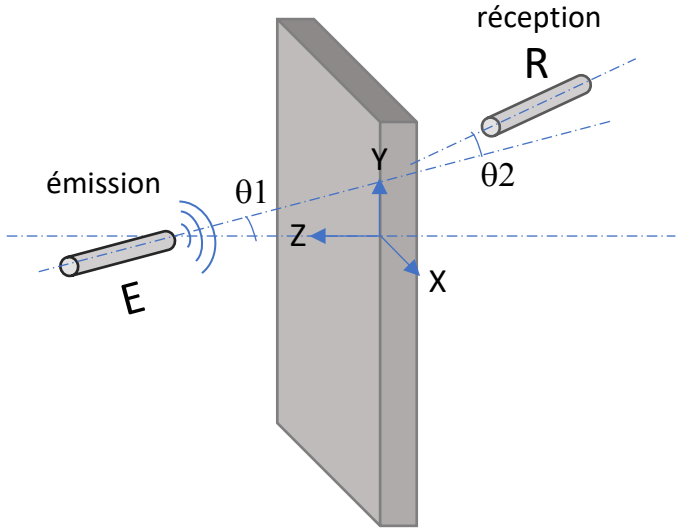
Nom expérience :

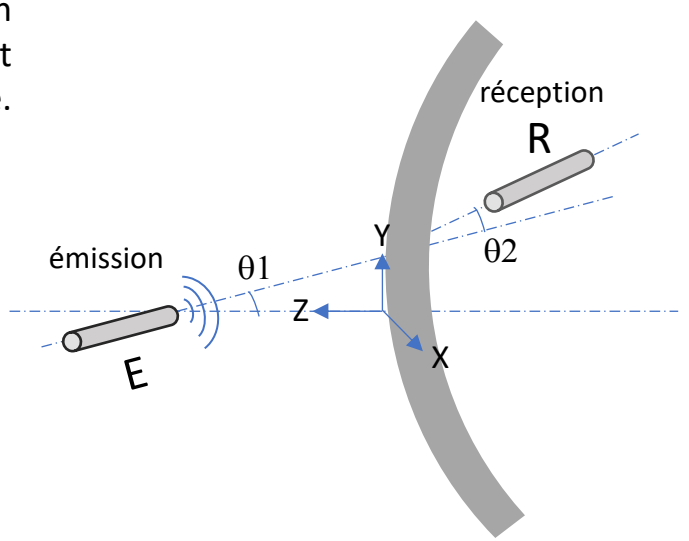
USTBOI : UltraSound Transmission Bulk waves Oblique Incidence

Infos sur la trajectoire associée :

- Identique à Manip n°1 sauf que l'axe de E à R forme un angle $\theta 1$ non nul dans le plan YZ (généralement entre 0° et 20°) par rapport à la normale locale à la surface située du coté de E). Cette configuration peut être obtenue en imposant une rotation de E de l'angle souhaité (par exemple $\theta 1$ dans le plan XZ) et une rotation de R de l'angle souhaité (par exemple $\theta 2$ dans le plan XZ). Si nécessaire, l'utilisateur règlera un décalage entre l'axe de E et l'axe de R, suivant X, pour que R détecte de manière optimale les ondes US transmises par la pièce (ces ondes vont être légèrement décalées suivant X sous l'effet de l'angle d'incidence $\theta 1$ non nul). Ensuite, lors des déplacements de l'ensemble E et R, les réglages établis durant la phase de calibration devront être conservés relativement à la pièce, que celle-ci soit plane ou courbe.

- Une configuration similaire peut être obtenue en imposant une rotation de E d'un angle $\varphi 1$ dans le plan YZ et une rotation de R d'un angle $\varphi 2$ dans le plan YZ. De même, l'angle d'incidence $\varphi 1$ pouvant engendrer un décalage suivant Y des ondes transmises par la pièce, l'utilisateur règlera un décalage entre l'axe de E et l'axe de R, suivant Y, pour que R détecte de manière optimale les ondes US transmises par la pièce. Configurations non dessinées.





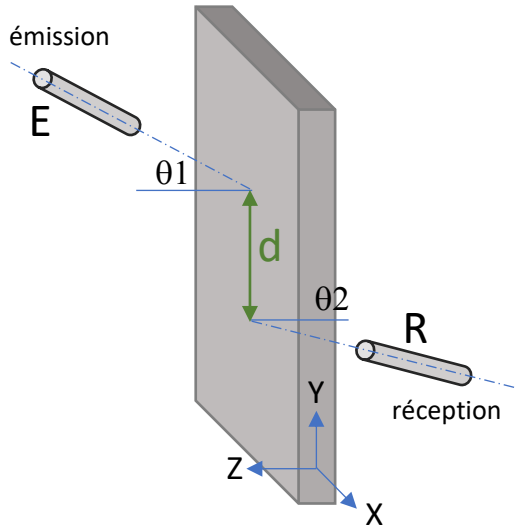
Manip. US n°2

3

Nom expérience :
USTG : UltraSound Transmission Guided waves

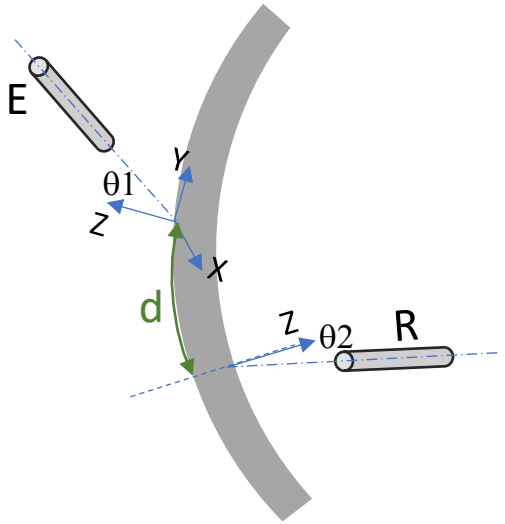
Infos sur la trajectoire associée :

- Les transducteurs sont disposés de part et d'autre de la pièce à inspecter. Ils sont parfaitement alignés, i.e. à ±0.1mm, suivant X (ou Y) mais décalés suivant Y (ou X) d'une distance réglable par l'utilisateur pendant la phase dite de calibration des physiques. Pendant cette phase, l'utilisateur règle aussi leurs angles respectifs $\varphi1=\varphi2=0$ dans le plan XZ (ou $\theta1=\theta2=0$ dans le plan YZ) et leurs angles respectifs $\theta1$ et $\theta2$ non nuls et dans le plan YZ (ou $\varphi1$ et $\varphi2$ non nuls dans le plan XZ) ; les 2 angles non nuls prennent une valeur comprise entre -30° et +30° ; les 4 angles (nuls ou pas) sont définis par rapport aux normales locales respectives (une au point de visée de E et l'autre au point de visée de R), qui peuvent changer pendant le déplacement de E et R (pièce non plane suivant X et/ou Y) et doivent rester constants (à ±1°) pendant le déplacement de E et R ; la distance d entre les zones visées par E et R, en surface de la pièce, doit aussi rester constante, ainsi que leur distance à la surface de la pièce.



- Chaque transducteur est distant (suivant Z) d'une valeur comprise entre 15mm et 200mm ; cette valeur correspond à la distance entre la face active du transducteur et la surface visée de la pièce (sous E ou sous R).

- Le mouvement et les acquisitions des signaux sont synchronisés :
  - Mode pas à pas : L'utilisateur doit définir la ROI, le pas en X et le pas en Y ; pour chaque nouvelle position de E et R, le SolRob envoie un trigger qui déclenche une mesure ;
  - Mode continu : le système SolRob déplace continûment le couple E-R et envoie un trigger à des intervalles de temps (à définir selon la vitesse, la décélération ou l'accélération) pour déclencher des mesures avec un pas constant suivant X et suivant Y. L'utilisateur doit définir la ROI, la vitesse de déplacement de SolRob (vitesse suivant X et Y en milieu de ROI), le pas en X et le pas en Y. Le système doit calculer les Δt du trigger, qui ne sont pas forcément constants puisque les déplacements de E et R doivent ralentir à l'approche d'un bord de la ROI et ré-accélérer en s'éloignant du bord.



Variante 1 d'US n°2

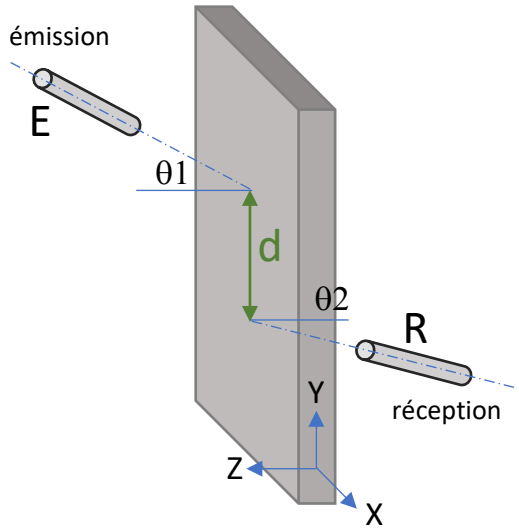
3

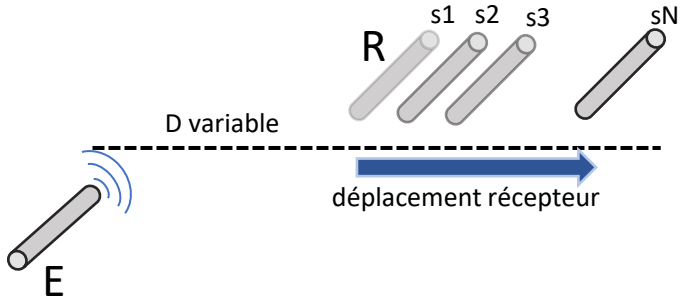
Nom expérience : USTGVD : UltraSound Transmission Guided waves with Variable Distance emitter / receiver

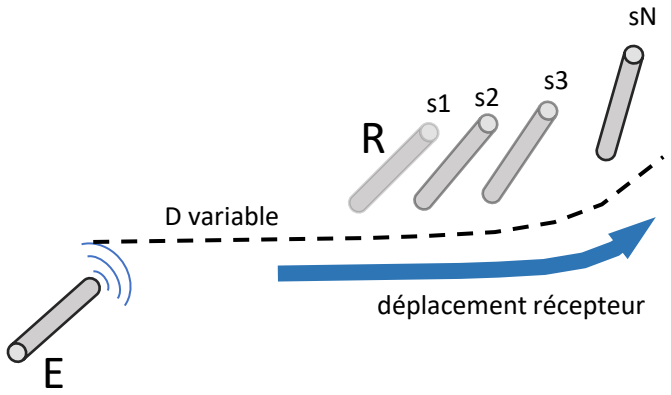
Infos sur la trajectoire associée :

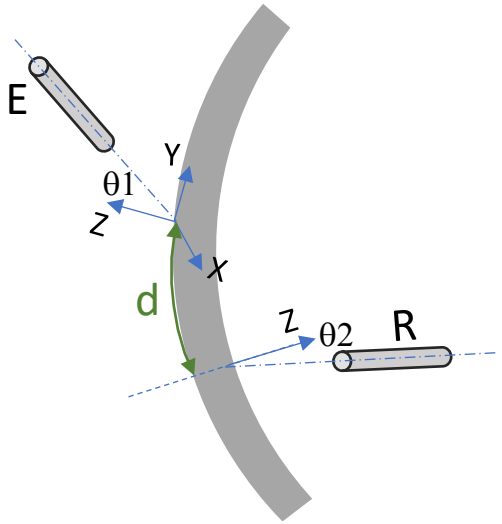
- Mêmes réglages et mêmes déplacements de l'ensemble E-R avec les mêmes conditions de précisions pour les orientations (précision maximale de ±1°), distances à la pièce (précision maximale de ±1.5mm) et distance de propagation à la surface de la pièce (d), sauf que pour chaque nouvelle position de l'ensemble E-R, E va rester immobile alors que R va se déplacer de manière à augmenter d de sa valeur initialement réglée par l'utilisateur (disons d_1) à une valeur finale (notée d_N) avec un pas Δd. Usuellement, la distance ajoutée d_N- d_1 est comprise entre 30mm et 200mm et le pas Δd est compris entre 0.25mm et 5mm. La distance de propagation en surface de la pièce, d, devient donc variable avec une précision ±1°. Ce mouvement ne sera pas répété pour un grand nombre de positions de l'ensemble E-R ; généralement, on exécute ce mouvement de translation de R (E étant fixé) pour moins de 10 positions du système E-R par rapport à la pièce, e.g. pour un panneau de longueur 2m et hauteur 1m, ce mouvement de translation sera accompli pour deux zones vers le bas du panneau, 2 zones vers le milieu et 2 zones vers le haut.

- A chaque nouvelle position de R, un signal de synchronisation doit être envoyé par SolRob au logiciel d'acquisition qui lancera la mesure d'un signal ultrasonore









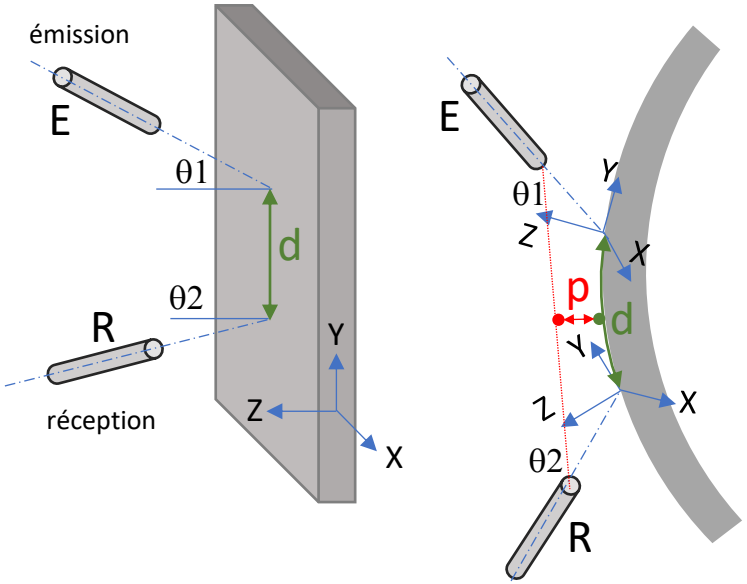
Variante 2 d'US n°2

3

Nom expérience :
USRG : UltraSound Reflection Guided waves

Infos sur la trajectoire associée :

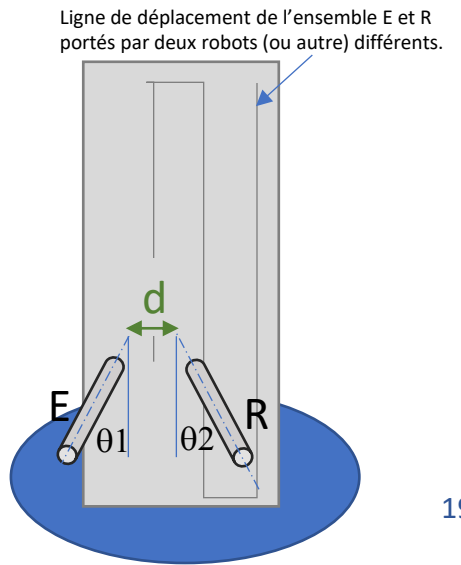
Identique à Manip n°2 sauf que E et R sont disposés d'un même coté de la pièce à inspecter et installés sur un porte-transducteur spécifique qui permet de régler leur distance et leurs angles d'orientation non nuls (θ1 et θ2 ou φ1 et φ2 selon que leur inclinaison soit dans le plan YZ ou XZ, respectivement) ; ces réglages vont donc fixer la distance d de propagation à la surface du matériau inspecté. Cette distance d sera constante pendant les déplacements, si la pièce est plane (puisque déterminée par les positions fixes de E et R sur l'effecteur), mais elle ne pourra forcément pas rester constante si la pièce devient localement courbe (ou change de courbure).



Un porte-transducteur est disponible à l'ICNDE, mais il pourra être reproduit par l'intégrateur de la solution SolRob pour être optimisé (plus léger, plus facile pour régler les angles θ1 et θ2 ou la distance d, etc…). Cet effecteur spécifique sera porté par un seul des deux robots (si la solution choisie intègre des robots). Comme indiqué à la fin du paragraphe précédent, il ne pourra pas garantir que la distance d soit constante, ni que E et R soient toujours à la même distance d'une pièce courbe ; pour cette raison, il est souhaitable que la distance p entre la position moyenne de l'ensemble E-R (centre géométrique des faces actives de E et R : ● sur le schéma) et milieu de la distance d de propagation à la surface de la pièce (● sur le schéma) soit conservée constante.

Alternative 2 robots

La solution ne doit pas exclure d'utiliser les deux robots (ou deux autres supports mobiles automatisés, si des robots ne sont pas choisis pour SolRob, e.g. machine spéciale avec 3 axes de translation et 3 rotules θ, φ et ϕ) pour porter indépendamment E et R, les orienter aux angles souhaités (θ1 et θ2 ou φ1 et φ2) et les déplacer simultanément pour inspecter la pièce. Certaines géométries de pièces pourraient permettre cela, par exemple un panneau plan (ou une pièce cylindrique) qui serait posé verticalement sur le plateau tournant, et chaque « robot » qui porterait, positionnerait, orienterait et déplacerait chaque transducteur (E et R) pour inspecter la pièce.



Manip US n°3

1b

Nom expérience :

USRGT : UltraSound Reflection Guided waves Tomographie

Infos sur la trajectoire associée :

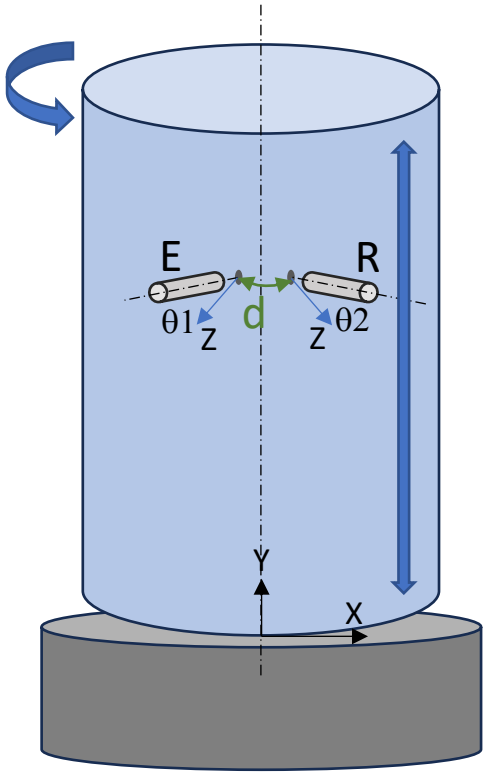
Tout comme pour la variante n°1 de Manip US n°2, E et R sont situés du même coté de la pièce et maintenus par le porte-transducteurs qui permet de régler leurs orientations angulaires et la distance qui les sépare (donc la distance de propagation d à la surface de la plaque). Le porte-transducteurs est fixé à l'extrémité d'un robot (ou autre axe de mouvement vertical). La pièce est maintenant un cylindre posé verticalement sur un plateau horizontal tournant. Les axes du plateau et de la pièce coïncident parfaitement. La pièce est fermement bridée sur le plateau en essayant de dégager au maximum sa surface extérieure pour permettre l'accès de E et R.
L'émetteur E forme un angle non nul $\theta 1$ (entre -20° et 20° dans le plan XZ) par rapport à la normale locale de la zone qu'il vise à la surface de la pièce. Le récepteur R forme un angle non nul $\theta 2$ (entre -20° et 20° dans le plan XZ) par rapport à la normale locale de la zone qu'il vise à la surface de la pièce. Ces angles sont réglés manuellement par l'utilisateur lors de la phase de calibration de la physique, en utilisant les degrés de libertés du porte-transducteurs, ainsi que la distance de propagation d à la surface de la pièce (longueur en surface de la pièce entre le centre de la zone visée par E et le centre de la zone visée par R). La distance de l'ensemble E-R (centre géométrique ●) et la surface de la pièce (●) est aussi réglée pendant cette phase de calibration, mais ce sera une donnée gérée et contrôlée pendant les mouvements du robot. La solution ne doit pas exclure d'utiliser les deux robots (ou deux autres supports mobiles automatisés, si des robots ne sont pas choisis pour SolRob) pour porter indépendamment E et R, les orienter aux angles souhaités ($\theta 1$ et $\theta 2$ ou $\varphi 1$ et $\varphi 2$) et les déplacer simultanément pour inspecter la pièce.

Une fois ces réglages effectués, ils doivent être conservés pendant tous les mouvements de E, R et du plateau décrits ci-après :

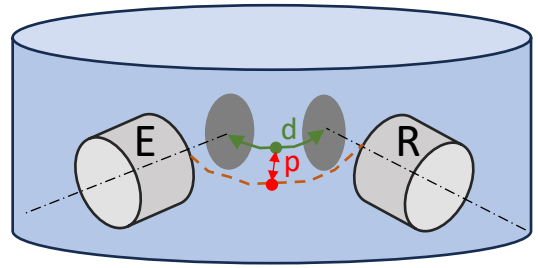
La pièce, solidaire du plateau tournant, est tournée pas à pas autour de son axe pour une plage de valeurs comprises entre 0° et 359° avec un pas $\Delta\phi$ (par exemple de 0° à 340° avec $\Delta\phi$=20°). Pour chaque position angulaire ϕ de la pièce, l'ensemble E-R est déplacé verticalement en mode pas à pas ou en mode continu :

- Mode pas à pas : L'utilisateur doit définir le pas du déplacement vertical ΔY ; pour chaque nouvelle position de E et R, le SolRob envoie un trigger qui déclenche une mesure ;

- Mode continu : le système SolRob déplace continûment le couple E-R suivant Y et envoie un trigger à des intervalles de temps (à définir selon la vitesse, la décélération ou l'accélération près des bords de la pièce) pour déclencher des mesures avec un pas spatial constant suivant Y. L'utilisateur doit définir la ROI (hauteur d'inspection suivant Y, plage angulaire et pas angulaire), la vitesse de déplacement de SolRob (vitesse maxi suivant Y), le pas en Y. Le système doit calculer les Δt du trigger, qui ne sont pas forcément constants puisque les déplacements de E et R doivent ralentir à l'approche d'un bord de la ROI et ré-accélérer en s'éloignant du bord.



Zoom



Positionnements et mouvements requis pour les expérimentations tera-hertz (THz)

Pour toutes les expériences décrites dans cette partie, l'émetteur (E) et le récepteur (R) sont rassemblés dans un objet de petite taille (contenu dans un parallélépipède de coté 150mm) dont le poids n'excède pas 500g. Deux mouvements de SolRob sont requis pour cette physique ; ils correspondent respectivement aux mouvements décrits par USRG (variante 2 d'US n°2) et USRGT (US n°3).

Manip. THz n°1

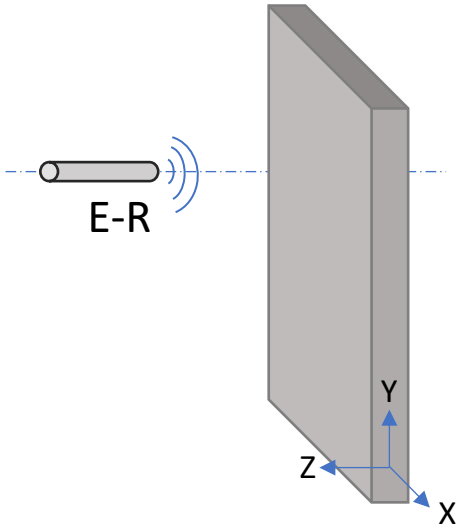
1a

Nom expérience :

THz-R : Tera-Hertz wave Reflection

Infos sur la trajectoire associée :

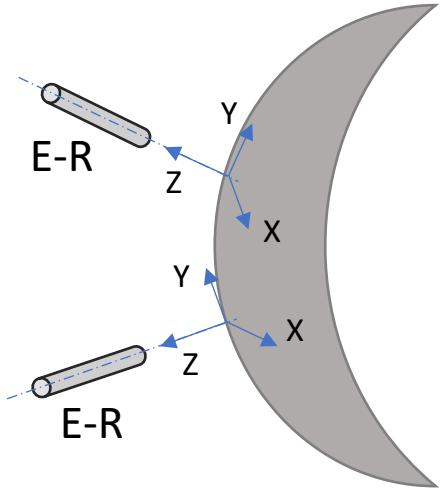
Le système E-R à ondes THz de type Radar modulé en Fréquence est placé d'un coté de la pièce à inspecter, son axe est réglé perpendiculairement à la surface de la pièce (colinéaire à la normale au niveau de la zone visée). La distance entre la face active du système E-R THz peut changer selon la fréquence du système employé (120 GHz, 240 GHz …) ; cette distance sera réglée par l'utilisateur, lors de la phase de calibration, à une valeur comprise entre 50 et 150 mm (selon les lentilles employées). Elle devra rester constante (à ± 1.5mm) durant tous les déplacements définis et gérés par SolRob. De même, l'axe du système E-R THz devra être colinéaire (à ±1°) à la normale locale, au niveau de la surface visée, que la pièce soit plane ou courbe suivant X et/ou Y.



L'ensemble E-R est déplacé dans le plan XY en mode pas à pas ou en mode continu :

- Mode pas à pas : L'utilisateur doit définir le pas du déplacement vertical ΔY ; pour chaque nouvelle position de E et R, le SolRob envoie un trigger qui déclenche une mesure ;

- Mode continu : le système SolRob déplace continûment le couple E-R suivant Y et envoie un trigger à des intervalles de temps (à définir selon la vitesse, la décélération ou l'accélération près des bords de la pièce) pour déclencher des mesures avec un pas spatial constant suivant Y. L'utilisateur doit définir la ROI (hauteur d'inspection suivant Y, plage angulaire et pas angulaire), la vitesse de déplacement de SolRob (vitesse maxi suivant Y), le pas en Y. Le système doit calculer les Δt du trigger, qui ne sont pas forcément constants puisque les déplacements de E et R doivent ralentir à l'approche d'un bord de la ROI et ré-accélérer en s'éloignant du bord.



Manip. THz n°2

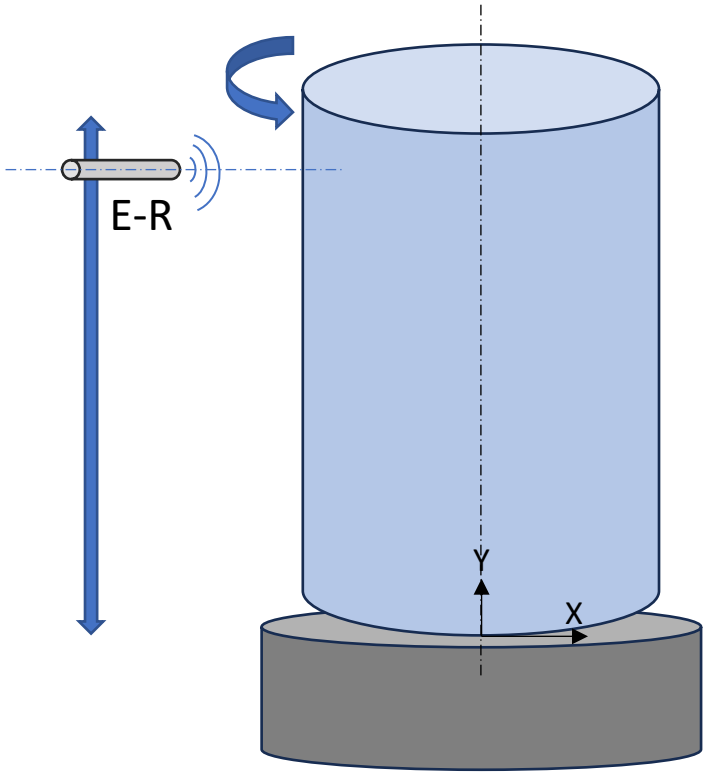
1b

Nom expérience :

THz-RT : Tera-Hertz wave Reflection Tomographie

Infos sur la trajectoire associée :

Le système E-R à ondes THz est placé d'un coté de la pièce à inspecter, son axe est réglé perpendiculairement à la surface de la pièce (colinéaire à la normale au niveau de la zone visée). La distance entre la face active du système E-R THz peut changer selon la fréquence du système employé (120 GHz, 240 GHz …) ; cette distance sera réglée par l'utilisateur, lors de la phase de calibration, à une valeur comprise entre 50 et 150 mm. Elle devra rester constante (à ± 1.5mm) durant tous les déplacements définis et gérés par SolRob. De même, l'axe du système E-R THz devra être colinéaire (à ±1° au mieux) à la normale locale, au niveau de la surface visée, que la pièce soit plane ou courbe suivant X et/ou Y.



Une fois ces réglages effectués durant la phase de calibration, ils doivent être conservés pendant tous les mouvements de E, R et du plateau décrits ci-après :

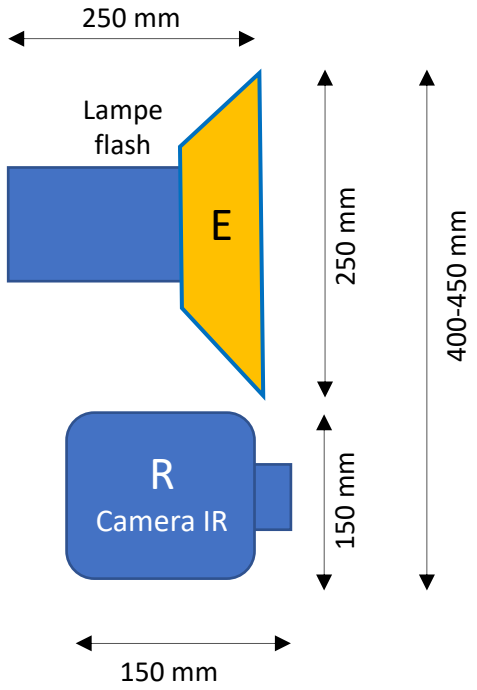
La pièce, solidaire du plateau tournant, est tournée pas à pas autour de son axe pour une plage de valeurs comprises entre 0° et 359° avec un pas $\Delta\phi$ (par exemple de 0° à 340° avec $\Delta\phi$=20°). Pour chaque position angulaire ϕ de la pièce, l'ensemble E-R est déplacé verticalement en mode pas à pas ou en mode continu :

- Mode pas à pas : L'utilisateur doit définir le pas du déplacement vertical ΔY ; pour chaque nouvelle position de E-R, le SolRob envoie un trigger qui déclenche une mesure ;

- Mode continu : le système SolRob déplace continûment le couple E-R suivant Y et envoie un trigger à des intervalles de temps (à définir selon la vitesse, la décélération ou l'accélération près des bords de la pièce) pour déclencher des mesures avec un pas spatial constant suivant Y. L'utilisateur doit définir la ROI (hauteur d'inspection suivant Y, plage angulaire et pas angulaire), la vitesse de déplacement de SolRob (vitesse maxi suivant Y), le pas en Y. Le système doit calculer les Δt du trigger, qui ne sont pas forcément constants puisque les déplacements de E et R doivent ralentir à l'approche d'un bord de la ROI et ré-accélérer en s'éloignant du bord.

Positionnements et mouvements requis pour les expérimentations Infra-Rouge (IR)

Pour toutes les expériences décrites dans cette partie, l'émetteur (E) et le récepteur (R) occupent un volume d'assez grande taille (contenu dans un parallélépipède de dimensions ≈ 150 x 250 x 450 mm^3) et le poids est aux alentours de 5kg. Deux mouvements de SolRob sont requis pour cette physique ; ils correspondent respectivement aux mouvements décrits par USRG (variante 2 d'US n°2) et USRGT (US n°3).



Manip. IR n°1

1a

Nom expérience :

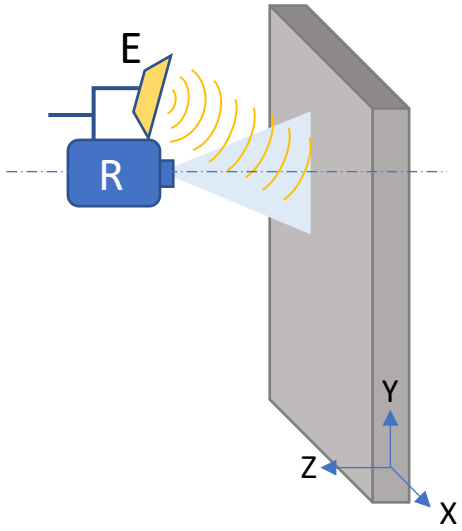
FIRR : Flash Infra-Rouge Réflexion

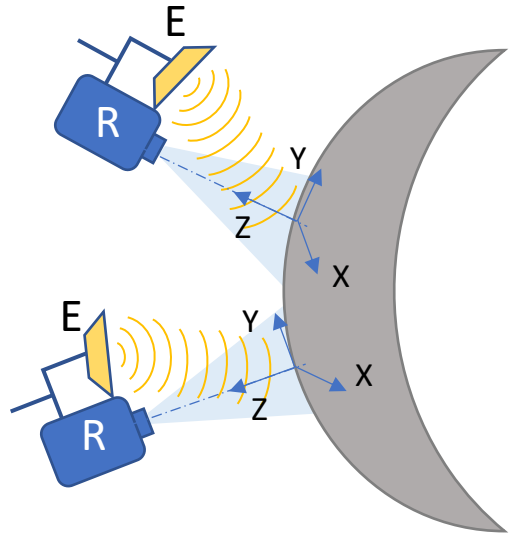
Infos sur la trajectoire associée :

Le système E-R IR est placé d'un coté de la pièce à inspecter. L'axe de la caméra est réglé perpendiculairement à la surface de la pièce (colinéaire à la normale au niveau de la zone visée). La distance entre la face active du système de mesure (lentille de la caméra) peut changer selon la résolution souhaitée ; cette distance sera réglée par l'utilisateur, lors de la phase de calibration, à une valeur comprise entre 250 et 400 mm. Elle devra rester constante (à ± 1mm) durant tous les déplacements définis et gérés par SolRob. De même, l'axe de la caméra devra être colinéaire (à ±1° voire ±2°) à la normale locale, au niveau de la surface visée, que la pièce soit plane ou courbe suivant X et/ou Y.

L'ensemble E-R est déplacé dans le plan XY en mode pas à pas :

- Mode pas à pas : L'utilisateur doit définir le pas du déplacement vertical ΔY ; pour chaque nouvelle position de E et R, le SolRob envoie un trigger qui déclenche une mesure ;





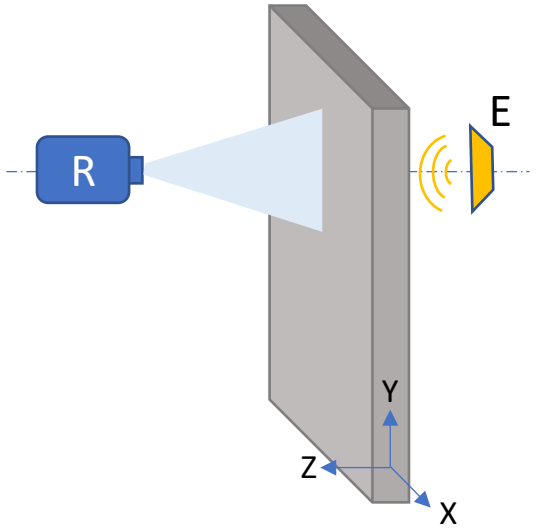
Manip. IR n°2

1a

Nom expérience :
FIRT : Flash Infra-Rouge Transmission

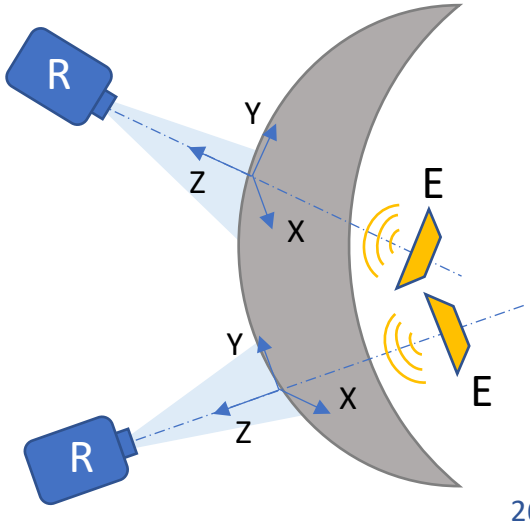
Infos sur la trajectoire associée :

E et R sont placés de part et d'autre de la pièce à inspecter. L'axe de la caméra est réglé perpendiculairement à la surface de la pièce (colinéaire à la normale au niveau de la zone visée) et l'axe de la lampe flash est aligné avec celui de la caméra tout en visant la face arrière de la pièce. La distance entre R (lentille de la caméra) et la pièce peut changer selon la résolution souhaitée et la distance entre E et la pièce peut aussi varier selon divers critères physiques ; ces distances seront réglées par l'utilisateur, lors de la phase de calibration, à des valeur comprise entre 250 et 400 mm. Elle devront rester constantes (à ± 1mm) durant tous les déplacements définis et gérés par SolRob. De même, les axes de la lampe (E) et de la caméra (R) devront rester colinéaires (à ±1° voire ±2°) à la normale locale, au niveau de la surface visée, que la pièce soit plane ou courbe suivant X et/ou Y.



L'ensemble E-R est déplacé dans le plan XY en mode pas à pas :

- Mode pas à pas : L'utilisateur doit définir le pas du déplacement vertical ΔY ; pour chaque nouvelle position de E et R, le SolRob envoie un trigger qui déclenche une mesure ;



Manip. IR n°3

1b

Nom expérience :
FIRRT : Flash Infra-Rouge Réflexion tomographie

Infos sur la trajectoire associée :

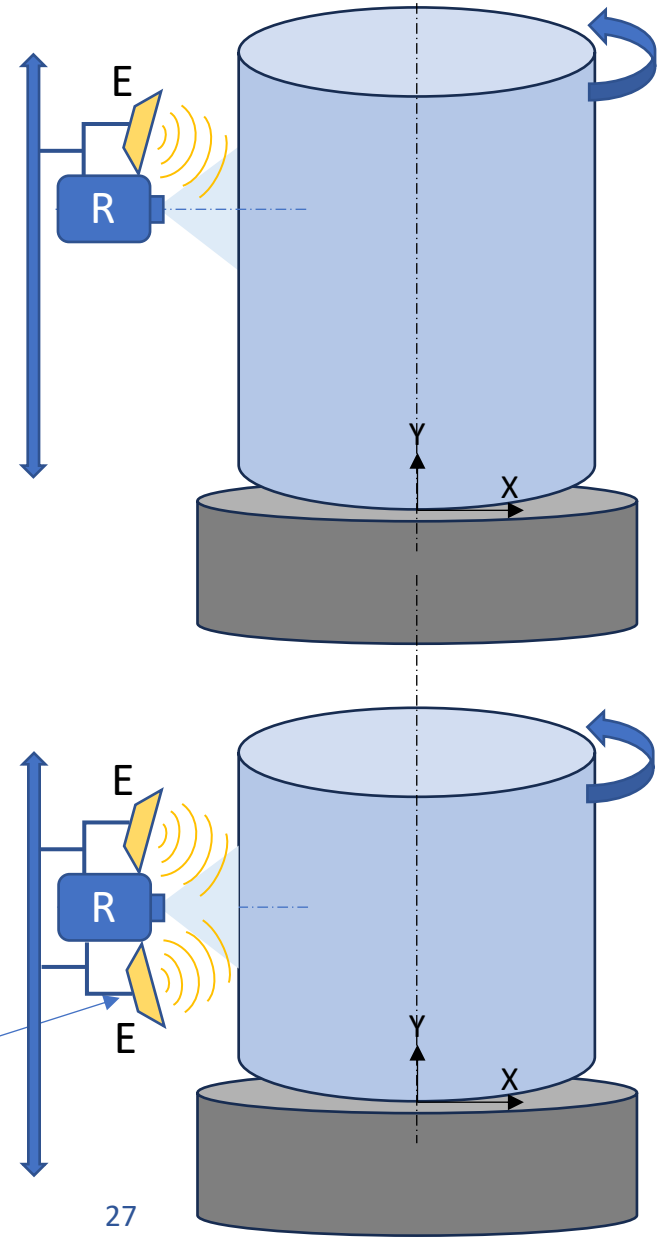
Même réglages que précédemment durant la phase de calibration menée par l'utilisateur, puis ces réglages devront être conservés pendant tous les mouvements de E, R et du plateau décrits ci-après :

La pièce, solidaire du plateau tournant, est tournée pas à pas autour de son axe pour une plage de valeurs comprises entre 0° et 359° avec un pas $\Delta\phi$ (par exemple de 0° à 340° avec $\Delta\phi$=20°). Pour chaque position angulaire ϕ de la pièce, L'ensemble E-R est déplacé dans le plan XY en mode pas à pas ou en mode continu :

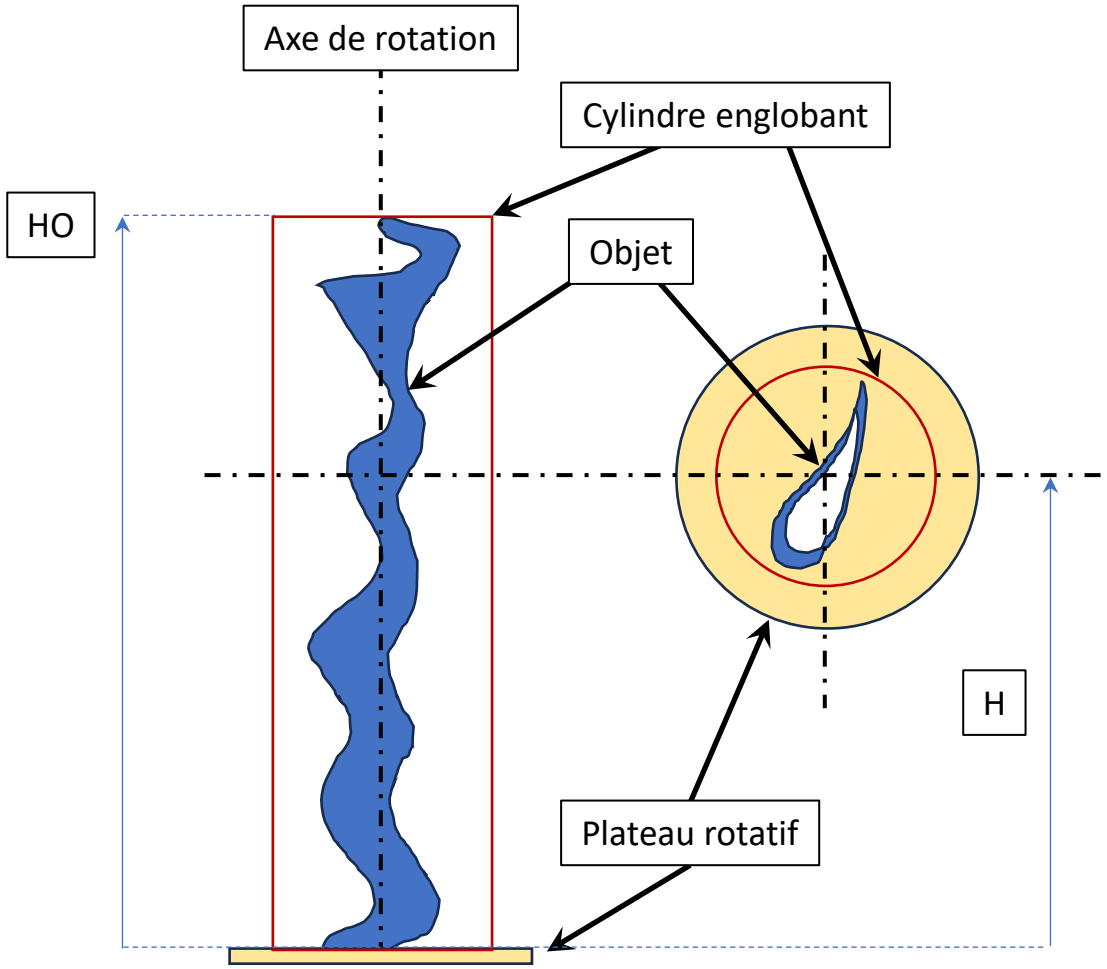
- Mode pas à pas : L'utilisateur doit définir le pas du déplacement vertical ΔY ; pour chaque nouvelle position de E et R, le SolRob envoie un trigger qui déclenche une mesure ;

- Mode continu : le système SolRob déplace continûment le couple E-R suivant Y et envoie un trigger à des intervalles de temps (à définir selon la vitesse, la décélération ou l'accélération près des bords de la pièce) pour déclencher des mesures avec un pas spatial constant suivant Y. L'utilisateur doit définir la ROI (hauteur d'inspection suivant Y, plage angulaire et pas angulaire), la vitesse de déplacement de SolRob (vitesse maxi suivant Y), le pas en Y. Le système doit calculer les Δt du trigger, qui ne sont pas forcément constants puisque les déplacements de E et R doivent ralentir à l'approche d'un bord de la ROI et ré-accélérer en s'éloignant du bord.

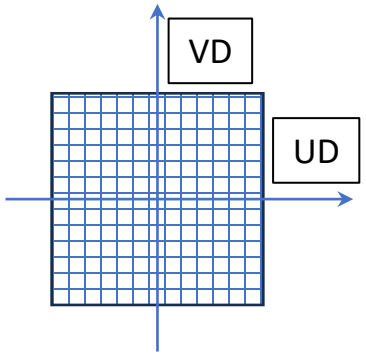
Option relative à l'effecteur : au lieu de porter une lampe flash et la caméra, l'effecteur pourrait porter deux lampes flash et la caméra. Les lampes seraient situées de part et d'autre de la caméra, au dessus et au dessous comme montré sur le schéma, ou alors à gauche et à droite de la caméra (non dessiné ici). Cet ensemble se déplacerait verticalement pendant que la pièce est fixe, pour contrôler une bande de la pièce, le long de sa génératrice, puis la pièce effectuerait une rotation pour que le système E-R fasse un autre déplacement vertical le long d'une autre génératrice. Le mouvement est le même que celui du schéma du haut (une seule lampe) mais l'emploi de deux lampes apporterait un chauffage plus fort. Les lampes doivent pouvoir être inclinées manuellement pour que l'utilisateur les oriente de façon optimale vers la zone à contrôle et ciblée par la caméra.



Acquisitions en RX définitions



L'objet à tomographier est placé sur le plateau rotatif.
L'axe de rotation de celui-ci est vertical.
Un cylindre de rayon RO est défini de façon à contenir la totalité de l'objet pour toutes les hauteurs de 0 à HO, c'est le cylindre englobant.
Pour la suite, les dimensions de l'objet qui seront considérées sont RO et HO.



Le détecteur est rectangulaire de hauteur HD (suivant l'axe VD) et largeur LD (suivant l'axe UD).

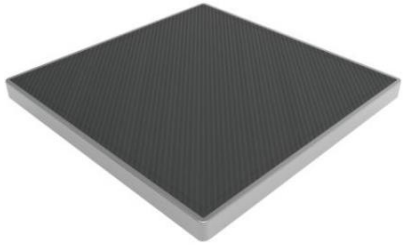
Acquisitions en RX caractéristiques des équipements sélectionnés

RX-Solutions a été choisi pour fournir les équipements et les logiciels pour la tomographie RX et la laminographie

Informations données à titre indicatif : toute question à leur sujet est à poser via la plateforme de consultation.
Après notification, le titulaire échangera directement auprès de RX-Solutions.



Générateur à rayons X 180kV micro-foyer scellé Hamamatsu L14351-02
Poids = 38 kg - Encombrement = 330 x 209 x 409 mm^3
Alimentation 220-240V 50Hz 16A
Transfert de données : RS232



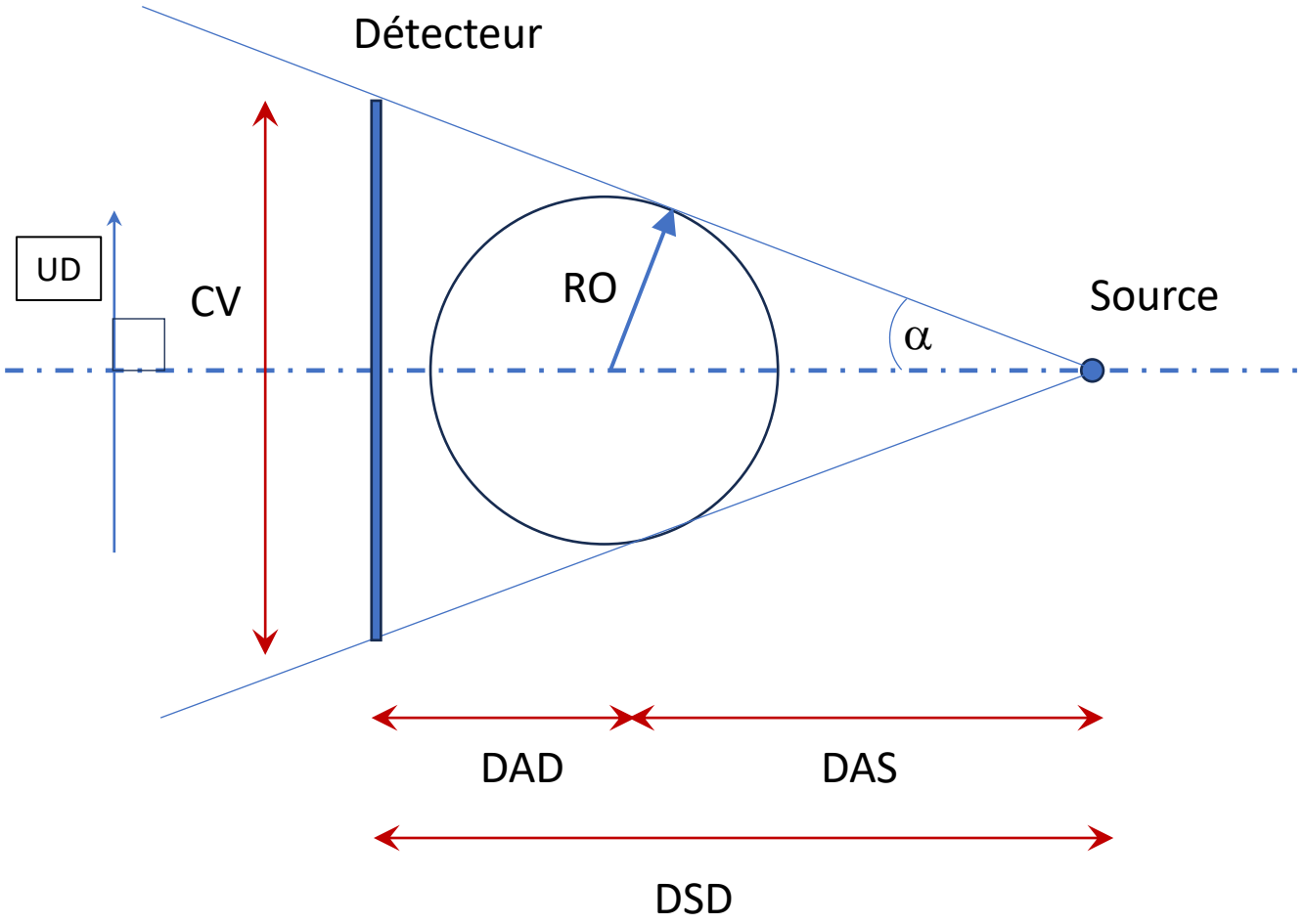
Imageur 43*43 cm^2 Varex XRD4343 CT
Poids = 16 kg - Encombrement = 470 x 470 x 57 mm^3
Alimentation 220-240V 50Hz 16A ; un module spécifique (XRD EPS) devra être embarqué par le robot
Transfert de données : fibre optique

Station de pilotage et d'acquisition type HP Z4 G5 sous Windows 11 Pro 64-bit
Logiciel d'acquisition RX-Solutions X-Act
Le logiciel échange avec un automate Beckhoff
Répétabilité de positionnement pour reconstruction optimale : inférieure ou égale à 0.1 mm

Manip. RX n°1

1a

Nom expérience :
TXS : Tomographie X Standard à la hauteur H



- La source émet un faisceau de RX conique de demi-angle α.
- La source est placée à la hauteur H et à la distance DAS de l'axe de rotation de façon à ce que l'objet soit entièrement dans le faisceau de RX.
- Le détecteur est placé de façon à ce que : i) son axe UD soit situé dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation passant par la source, ii) l'axe UD soit perpendiculaire à la droite de ce plan passant par la source et l'axe de rotation.
- Le détecteur est placé à la distance DAD de l'axe de rotation, ceci définit la taille CV du champ de vue.
- Pour imager le champ de vue le détecteur devra être déplacé ND-1 fois suivant la direction de l'axe UD.
- Source et détecteur étant positionnés, les ND images sont acquises pour la position angulaire courante.
- L'objet est tourné d'un angle $\delta\alpha$ et ND nouvelles images sont acquises.
- L'acquisition se termine lorsque l'objet a été imagé pour la totalité des positions angulaires prédéfinies.

Exemples de valeurs des distances pour des objets de différentes tailles

Hypothèses :

- l'angle α est fixé à 30°, une valeur « classique »
- DAD est fixé à RO + 10cm
- ND = CV/0,43 (une largeur « classique » pour un imageur compatible avec notre projet)

RO	Alpha (°)	DAS	DAD	DSD	CV	ND
0,75	30	1,50	0,85	2,35	2,71	6,31
0,60	30	1,20	0,70	1,90	2,19	5,10
0,50	30	1,00	0,60	1,60	1,85	4,30
0,25	30	0,50	0,35	0,85	0,98	2,28
0,20	30	0,40	0,30	0,70	0,81	1,88
0,15	30	0,30	0,25	0,55	0,64	1,48

Conclusions (uniquement à titre indicatif, les valeurs réelles seront connues lorsque le marché sera attribué) :

- Les valeurs de DSD et CV pour RO = 0,75m déterminent l'espace nécessaire pour les acquisitions.
- A chaque angle, même pour les objets les plus petits considérés ci-dessus, plusieurs images doivent être acquises.

- A la fin de la procédure 1 on obtient ND images pour M positions angulaires.
- Pour chaque position angulaire les ND images doivent être concaténées pour obtenir une image unique. Pour cela il est nécessaire que deux images voisines aient une zone commune constituée d'un nombre entier de colonnes de pixels (suivant la direction VD du détecteur).
- Pour assurer une bonne qualité de reconstruction du volume scanné, il est nécessaire de pouvoir acquérir les images pour un nombre de positions angulaires allant jusqu'à 3600.
- Les images acquises à la fin de la procédure 1 permettent la reconstruction d'un volume couvrant la largeur de l'objet sur une hauteur h correspondant à la hauteur HD du détecteur.

Tomographie pour une hauteur > h

- Première solution : effectuer plusieurs tomographies suivant la procédure 1 à différentes hauteurs.
  - Les différents volumes de hauteur h qui seront reconstruits doivent pouvoir être concaténés, ce qui implique que la géométrie d'acquisition définie pour la procédure 1 soit maintenue constante à chaque déplacement vertical et qu'une zone de recouvrement entre chaque volume successif soit définie.
- Seconde solution : effectuer une acquisition en mode **tomographie hélicoïdale**.
  - La géométrie d'acquisition est semblable à celle définie pour la procédure 1, mais lors de chaque rotation de l'objet, l'ensemble source-détecteur est déplacé verticalement d'un incrément calculé en fonction du grandissement géométrique et de la taille du détecteur de manière à ce que tout point du volume soit dans le champ de vue pendant la plage angulaire nécessaire (entre 180°+60 et 360°).
  - La précision du déplacement vertical et sa régularité peuvent limiter la résolution verticale du volume reconstruit, si elles sont insuffisantes.

Manip. RX n°3

1b

Nom expérience :

RXL : Rayons X Laminographie

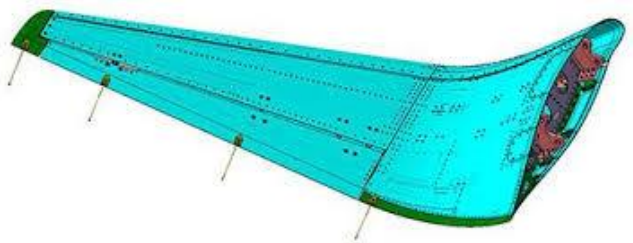
- Dans le cas d'une acquisition laminographique, l'objet reste fixe. Le détecteur et le tube décrivent une trajectoire planaire, perpendiculairement à l'axe du faisceau de rayons X.
- Au cours de l'acquisition, le tube effectue des déplacements latéraux et verticaux selon une grille irrégulière, de manière à couvrir la zone d'intérêt à scanner, augmentée de la surface correspondant à l'angle du faisceau intercepté par le capteur.
- Les mouvements du capteur sont synchronisés à ceux du tube pour maintenir le capteur en face du point focal à chaque position d'acquisition
- Une version expérimentale pourrait également introduire une rotation partielle de la pièce en plus des déplacements planaires.

Porte-pièces

Fonctionnalités du porte pièces / exemple de solution possible mais pas forcément optimale

Le porte pièces devra permettre de positionner des pièces en position verticale, de hauteur maximale 3 m et de diamètre maximal 1.5 m. Ces pièces pourront être tournées autour de leur axe vertical, sur 360°, avec un pas minimum de 0.1°. Ce positionnement des pièces pourra servir pour les inspections par chacune des 4 physiques (RX, US, IR, THz).

Le porte pièces devra également permettre de positionner horizontalement des pièces de dimensions pouvant atteindre 5 m de long (1), 2 m de hauteur et 1.5 m de largeur transverse. Ces pièces pourront être par exemple des panneaux (composites, bois, autres), des tuyaux (plastique, composites…), des winglets (1). Le plateau tournant devra être à la même hauteur que le reste du porte-pièces afin de servir de support pour les très grandes pièces.

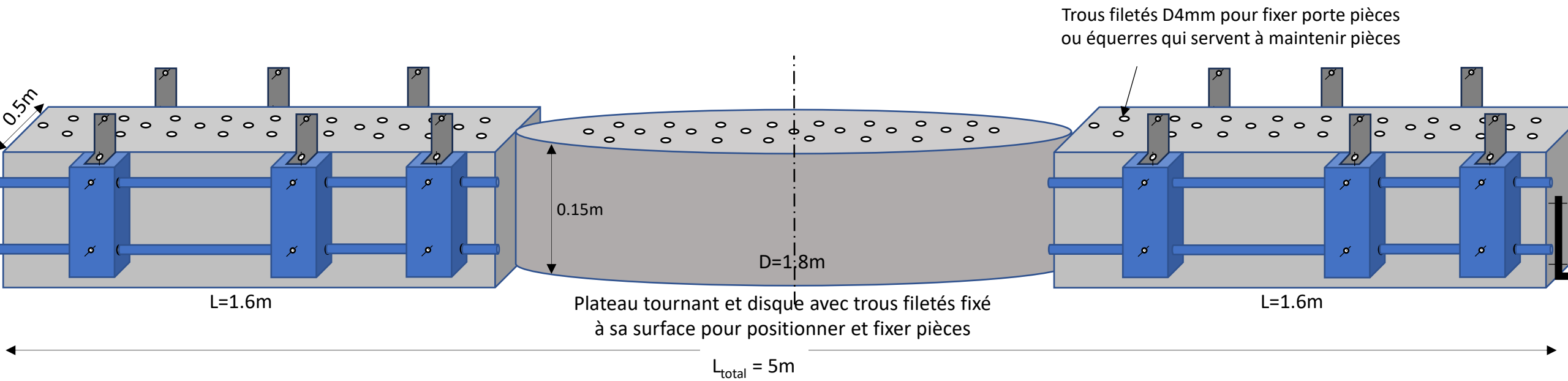


(1) Schéma de winglet

Porte-pièces

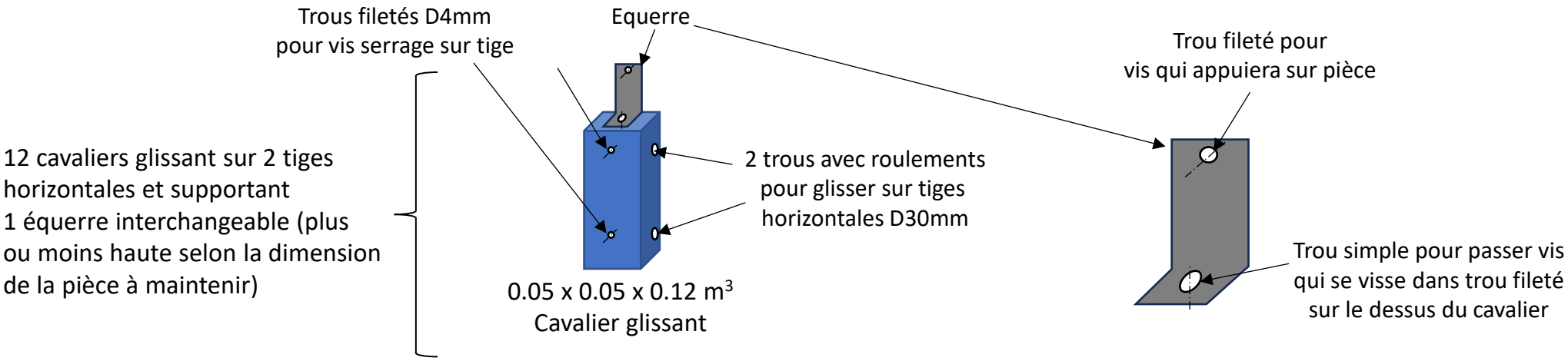
1a

Exemple possible mais pas exclusif



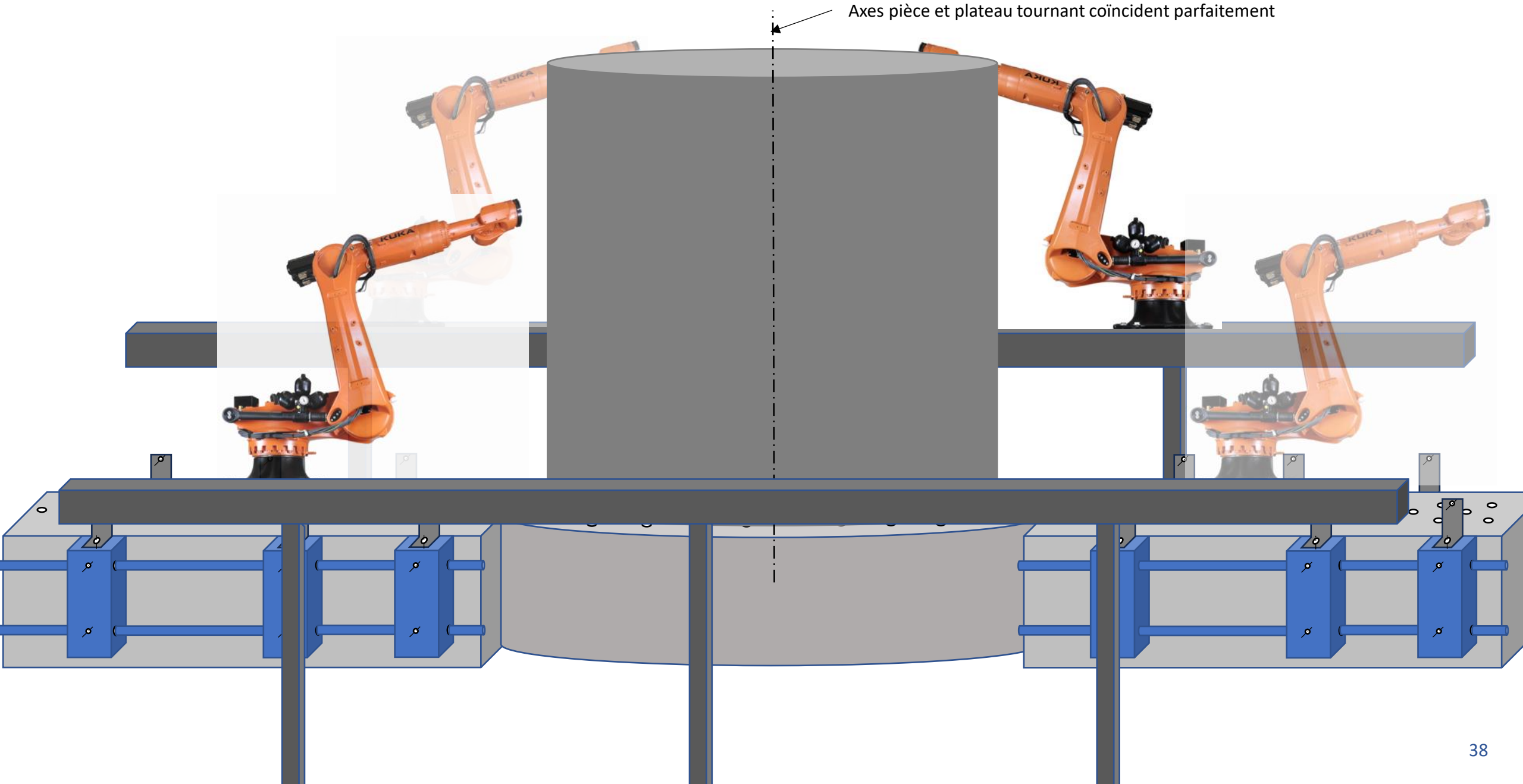
Echelle horizontale : 1cm ⟷ 0.15m

Porte-pièces

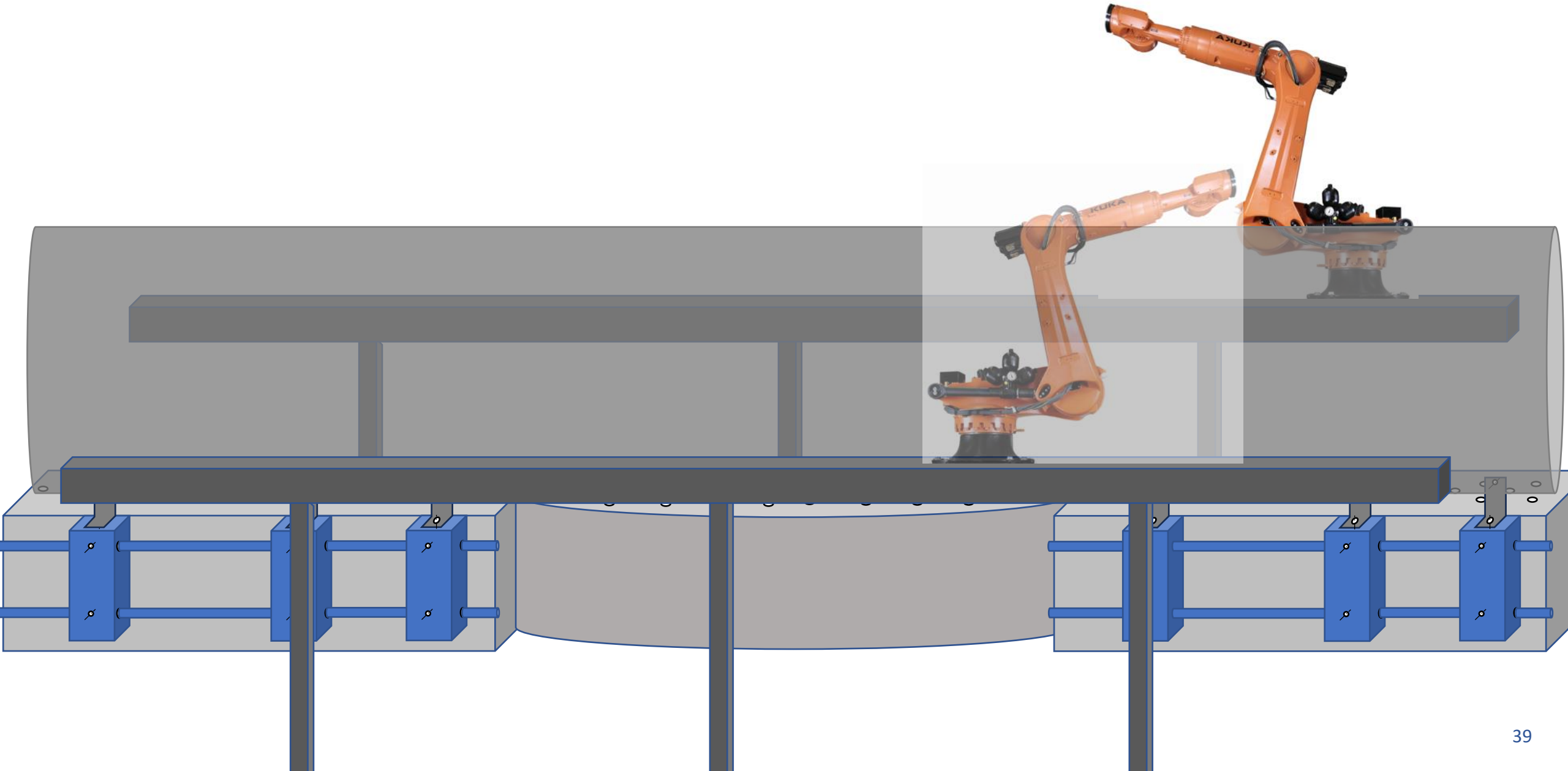


8 tiges cylindriques rigides, glissantes L=1.6m, D=3cm

Porte-pièces et glissières pour robots



Porte-pièces et glissières pour robots



Métrologie et recalage 3D des sources et capteurs pour le CND

Objet : fournir une solution pour mesurer en temps réel et corriger la position et l'orientation de l'émetteur et du récepteur de la physique de CND choisie (portés par 1 ou 2 robots ou autre système mécatronique) dans l'espace 3D. Ces positions et orientations doivent être connues l'une par rapport à l'autre et par rapport à la pièce contrôlée par CND.

Périmètre : la solution traite des pièces planes et des pièces de forme complexe (gauches, courbes ou à double courbure). Elle s'appuie sur la CAO de la pièce ou sur une numérisation de celle-ci.

Moyens de CND embarqués : les robots peuvent porter des capteurs ultrasons (sans contact), térahertz, infra-rouge ou rayons X. Ces techniques peuvent travailler en réflexion ou en transmission avec un émetteur et un récepteur placés de part et d'autre de la pièce.

Précision en position : ±0.1 mm sur X, Y et Z, pour la position relative entre les deux effecteurs comme pour la position de chaque effecteur par rapport à la pièce.

Précision angulaire : ±0.1° en θ (rotation dans le plan XY) et en ϕ (rotation dans le plan YZ). Cela doit permettre de garder la normalité ou l'alignement des capteurs.

Fonctions attendues : définir un repère commun (robots, pièce, cellule), recaler la pièce, mesurer en continu les poses, compenser les écarts (flexions, dérives thermiques, jeux, erreurs cinématiques) et corriger les trajectoires en boucle fermée.

Contraintes d'environnement : le système doit fonctionner en présence de rayonnements ionisants. Il ne doit pas perturber les mesures CND, ni par interférence électromagnétique ni par une ombre dans le faisceau.

Intégration : la solution doit être compatible avec des interfaces temps réel (latence et fréquence de mise à jour à préciser). Elle doit s'interfacer avec les logiciels d'acquisition CND, en particulier pour attacher la position de chaque mesure à la donnée acquise.

Volume de travail : la précision est garantie dans tout le volume utile des plus grandes pièces (5 x 2 x 1,5 m^3). L'étalonnage doit être traçable, avec une procédure de qualification et de vérification périodique.

Livrables : le système de mesure, le logiciel de recalage et de compensation, un bilan d'incertitude qui recense chaque source d'erreur (capteur, étalonnage, robots, flexions, thermique, vibrations…), chiffre sa contribution et démontre que leur combinaison respecte ±0.1 mm et ±0.1°), la documentation et la formation.

The end.