

L'EXPERT

Stéphane LECLERC

Ingénieur soudeur ESSA (EWE) et ingénieur CESI en informatique industrielle. Expert en soudage et conception de solution soudage impliquant des systèmes automatisés et mécanisés.



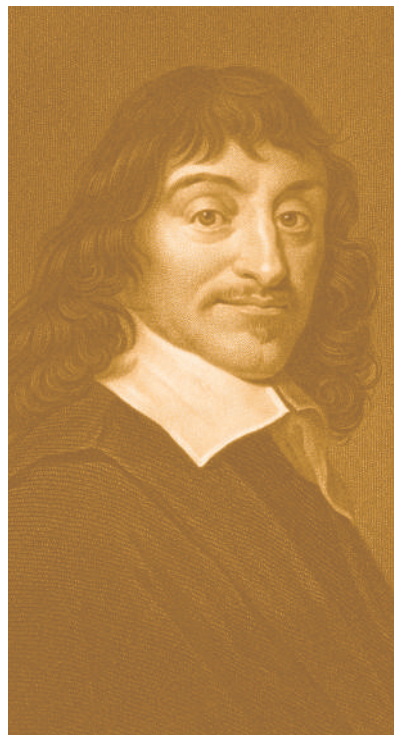
| LA RECHERCHE ET DESCARTES

Et si, en tout chercheur ou tout ingénieur, se cachait un cartésien qui s'ignorait ?

Approche cartésienne et innovation :
sont-elles compatibles ?

Je voudrais partager avec vous quelques réflexions sur la pertinence de l'approche proposée par Descartes pour la conduite de projets industriels ou la recherche appliquée. Face à un problème technique complexe, existe-t-il des approches permettant d'atteindre des solutions viables de manière efficiente ? Dit autrement : pourquoi tel ou tel projet aboutit-il à une solution pertinente de manière efficace ?

Pour illustrer mon propos, je vous propose d'analyser trois projets industriels réalisés pour EDF à dix ans d'intervalle, en appliquant le filtre proposé par René Descartes dans son *Discours de la méthode* (1637). Le premier a été réalisé en début de carrière d'ingénieur soudeur et le dernier quasiment en toute fin de carrière, avant mon départ à la retraite. Un test en fin de lecture permet de prolonger cette réflexion et de partager ses propres constats.



↑ René Descartes (1596–1650).

Rappel succinct du *Discours de la méthode* – publié en 1637
(source : *Livret Discours de la méthode. Classiques et Cie – Hatier*)*

Chiffres clés : 6, 4, 3

• 6, comme les 6 articulations du *Discours de la méthode* :

- **Partie 1 :** évaluation des sciences étudiées par Descartes : examen critique des sciences et identification de leurs limites.
- **Partie 2 :** règles de la méthode (voir les 4 règles ci-après).
- **Partie 3 :** morale provisoire : se définir une ligne de conduite pour séparer le vrai du faux (voir les 3 maximes ci-après).
- **Partie 4 :** principes métaphysiques : « *je pense donc je suis* », importance du doute, existence de Dieu, métaphysique (quelle est la source de la véracité des idées en moi ?).
- **Partie 5 :** aperçu de la physique nouvelle : transversalité des sciences pour expliquer un phénomène.
- **Partie 6 :** travailler au progrès des sciences : importance de la communication, du partage des savoirs au détriment potentiel du libre arbitre. Ne pas se laisser influencer par les pressions extérieures.

• 4, comme les 4 règles retenues par Descartes :

► **Règle de l'évidence** : s'impose d'elle-même, n'a pas besoin de démonstration, reste vraie en toute circonstance.

► **Règle de l'analyse** : du compliqué au simple, de l'inconnu au connu.

► Associée à la **règle de la synthèse** : du simple au compliqué, du connu à l'inconnu.

► **Règle du dénombrement** ou de l'énumération : s'assurer de la continuité du raisonnement.

• Et 3, comme les 3 maximes : **prudence** (conformisme : adopter les attitudes des hommes que l'on aura reconnus comme les plus sensés et les plus mesurés), **décision** (faire un choix raisonné et s'y tenir), **constance** (de l'ordre de la résignation, amour de la résignation, accepter l'incertitude en toute conscience jusqu'à la fin de

la démarche avant d'envisager un changement de méthode).

Relecture du projet : Soudage TIG orbital auto-adaptatif (machine Tigora) de la ligne AHP du réacteur REP 900 de Blayais 4 – Société : Comex Nucléaire (1993–1994)

Objectif

L'objectif de Tigora est le soudage à distance de tuyauterie par procédé TIG (soudage à l'arc électrique avec électrode réfractaire, à base de tungstène, sous atmosphère de gaz neutre) orbital (la machine tourne autour de la tuyauterie). Ces tuyauteries présentent des défauts d'accostage dans deux directions : dénivelé entre les bords à souder et écartements variables de 0 à 3 mm (jeu). L'opération de soudage est

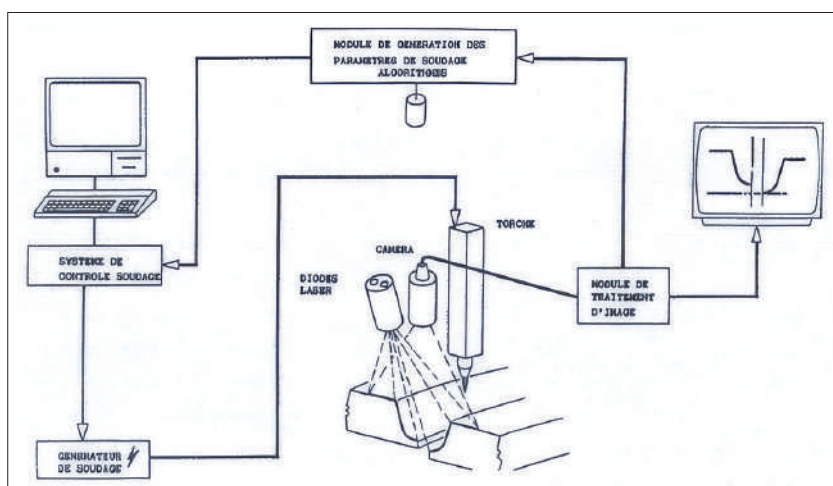
effectuée sans intervention humaine sur les paramètres et les réglages de la machine : les paramètres de soudage sont corrigés automatiquement en fonction des défauts d'accostage relevés en temps réel à 10 cm de la tête de soudage. L'objectif QHSE était de limiter, voire de supprimer, la présence d'un opérateur dans les zones irradiées pendant les opérations de maintenance des centrales nucléaires, en particulier sur les circuits primaires et secondaires principaux en acier inoxydable austénitique.



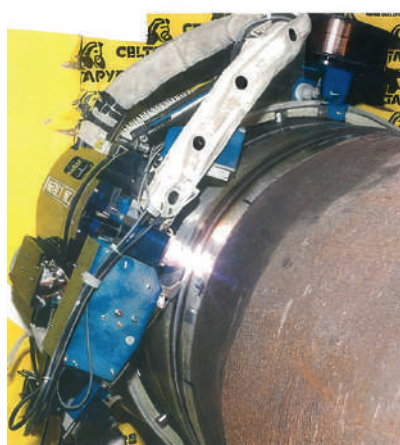
Partie 1

Dans les années 1990, les capteurs laser de suivi de joint étaient en développement (Servo-Robot au Canada), ainsi que le capteur Sylvarc de suivi de bain (Laboratoire de soudage du CEA à Saclay), mais ils n'étaient pas adaptés aux contraintes de miniaturisation et à la présence du fil d'apport nécessaire à la constitution du joint soudé. De même, l'Institut de Soudure développait MIG expert, un système expert d'aide à la mise au point de paramètres de soudage MIG-MAG robotisé, mais en programmation hors ligne. Cela a conduit rapidement à la conception d'un capteur spécifique intégrant toutes les contraintes du soudage TIG, un software et un hardware communiquant avec le générateur de soudage et une base de données de paramètres de soudage.

41



↑ Principe de fonctionnement de la machine Tigora.



← ↑ Machine Tigora – mise en service industrielle sur la ligne AHP du CNPE de Blayais 4 – 1994.



Partie 2

Avant d'appliquer le système Tigora sur des soudures en zone irradiée, il est décidé de le valider sur des tuyauteries en acier non allié, sans contrainte de dosimétrie, de manière à pouvoir appliquer un procédé standard qualifié en cas d'échec. Ceci a impliqué le développement et la qualification d'une base de données dédiée aux aciers inoxydables austénitiques selon les dispositions du code de construction RCC-M + AQUAP+ EN 288-3, puis d'une base de données spécifique ■ ■ ■

■ ■ ■ pour les aciers non alliés de type A48 (groupe 1.1 de FD CEN ISO/TR 15608:2013-06).



Partie 3

Pour pouvoir couvrir un domaine d'application le plus large possible en termes de défauts d'accostage (jeu et dénivelé entre les bords à souder des tuyauteries), il est décidé de construire une base de données de paramètres de soudage en limitant le nombre de variables. Par exemple, la géométrie des chanfreins est considérée comme une constante après application de tolérances d'usinage serrées. De même, la vitesse de soudage a été fixée à une valeur constante pendant la durée de réalisation d'une passe de soudage, de manière à ne pas générer d'à-coups sur le mouvement orbital de la tête de soudage.

Par souci de simplification, la recherche de paramètres de soudage a été découpée en jeux de paramètres dépendant de 2 facteurs : le jeu entre les bords à souder et la position orbitale de la tête de soudage autour de la tuyauterie. Au final, les paramètres corrigés en temps réel se réduisent au nombre de 4 : l'intensité de soudage, la tension d'arc, la vitesse du fil d'apport et la largeur de balayage transversal de la torche de soudage. Les corrections sont apportées de manière discrète, sans lissage entre zones.



Partie 4

La question du doute a été un leitmotiv tout au long de ce projet. Quand j'appuie sur le bouton « Start », est-ce que j'ai assez confiance dans le système Tigora pour laisser la machine effectuer ses corrections en temps réel sans intervention humaine ?

Pour se convaincre et satisfaire aux exigences du référentiel de qualification des modes opératoires de soudage du moment (RCC-M + AQUAP+ NF EN 288-3), l'essai de qualification a été effectué sur un

assemblage de 2 tubes présentant un jeu variable de 0 à 2,5 mm, couplé à un dénivelé variable de 0 à 1,5 mm, en présence de l'Institut de Soudure. Cet essai a permis de qualifier une base de données de paramètres de soudage pour une mise en œuvre de Tigora en mode auto-adaptatif pour la passe de racine et en mode mécanisé téléopéré pour les passes de remplissage du joint, sur acier faiblement allié de type TU 48 C (NFA 49213) et acier inoxydable austénitique (316 LN). Le bilan de ce projet a mis en lumière que les difficultés ne sont pas apparues sur les aspects innovants du soudage auto-adaptatif, mais sur le volet matériau de base.

Pour des considérations de délai d'approvisionnement jugé trop long, le développement a été réalisé avec des tubes de nuance TUE 250 sans traitement de normalisation (NFA 49211). Cela a généré deux problèmes : les caractéristiques de flexion par choc sur produit étaient conformes avec marge (critères de 28 J en valeur individuelle, 40 J en valeur moyenne à 0 °C), mais pas à l'état normalisé. Après soudage, les valeurs de résilience en ZAT (zone affectée thermiquement) étaient proches des limites et régulièrement en dessous du critère. Une expertise a révélé un phénomène de vieillissement en ZAT provoqué par l'absence de traitement de normalisation. Les cycles thermiques du soudage en multipasses accéléraient le phénomène de vieillissement en ZAT. Plusieurs pistes ont été explorées et se sont soldées par des échecs : réduction de l'affectation des ZAT en diminuant l'apport de chaleur et en modifiant la position des passes latérales en bord de chanfrein en J. Ces pistes ont généré une faiblesse du point de vue des défauts de manque de fusion en bord de chanfrein, sans augmenter significativement la résilience en ZAT. Il a été décidé de réapprovisionner un tube à partir de tôles en A48FP, roulées et soudées, puis d'effectuer un traitement

thermique de détensionnement, qui s'est révélé inadapté du fait d'un taux de déformation supérieur à l'attendu : il aurait fallu un traitement de qualité (normalisation).

Au final, ces mauvaises décisions de projet, basées sur le planning, ont été prises dans l'urgence, sans le recul nécessaire pour bien appréhender les impacts des options techniques, et ont provoqué un retard de 6 mois sur le projet, accompagné de dommages collatéraux : baisse de crédibilité technique vis-à-vis du client et baisse de motivation des équipes. Les problèmes de résilience se sont résolus d'eux-mêmes en réapprovisionnant un tube TU 48 C selon la norme NFA 49213, avec garantie de résilience à 0 °C après traitement de normalisation et certificat de recette 3.1b : le mode opératoire de soudage mis au point initialement sur la base de la problématique de soudabilité opératoire a pu être mis en œuvre sans restriction sur les paramètres de soudage, tout en obtenant des valeurs de résilience en ZAT avec marge (position verticale descendante : 184 J en individuel, 210 J en moyenne ; position verticale montante : 148 J en individuel, 175 J en moyenne à 0 °C).



Partie 5

À titre d'exemple, les interactions entre les flux gazeux (gaz de soudage et de protection envers), les mouvements de convection, la forme du chanfrein en J, le diamètre de buse de gaz et le débit de gaz ont été mises en évidence lors de la mise au point du mode opératoire de soudage, avec leurs impacts sur les fumées de soudage et les défauts de type soufflure.



Partie 6

À la suite de la première mise en service industrielle sur le CNPE de Blayais 4, le projet Tigora a donné lieu à une publication comparative entre soudage manuel et soudage auto-adaptatif/téléopéré dans la revue

Soudage et Techniques Connexes de l'Institut de Soudure (voir novembre/décembre 1995) et à une présentation lors d'une conférence IS/TWI, *Fifth International Conference Computer Technology in Welding*.

**Relecture du projet :
Remplacement des guides
de grappe des assemblages
combustibles-réacteurs REP
– Société : Comex Nucléaire
(2005–2007)**

Objectif

L'objectif du projet est de remplacer les broches de guide de grappe endommagées (broche fendue élastique destinée au maintien en position des guides de grappe nécessaires au pilotage d'un réacteur nucléaire REP) par des moyens téléopérés sous eau borée à une profondeur de 12 m. Le volet soudage de ce projet consiste à réaliser une soudure d'arrêt en rotation de la douille vissée sur la broche après installation de cette douille sur la platine support du guide de grappe (2 broches par platine) : soudure dite « *corps/chapeau* », entre un axe Ø 6 mm inséré dans l'écrou et un chapeau emboîté dans la tête de vis. La difficulté réside dans l'accessibilité à la zone de travail, dans l'environnement aquatique et irradiant et dans l'absence de solutions « *sur étagère* » : soudure angulaire de 6,35 mm de longueur à réaliser dans une cloche du volume d'un bouchon de champagne ! Durée de développement contractuelle : 12 mois.



Partie 1

L'inventaire des solutions techniques existantes conduit à des opérations réalisées à sec en concevant des boîtes à gants blindées pour assurer la protection des opérateurs. L'innovation consiste à utiliser l'eau comme écran protecteur contre l'irradiation.



Partie 2

L'approche a consisté à retenir une technique de soudage habituellement mise en œuvre à l'air libre ou en boîte à gants et à la mariner. Le soudage TIG automatique avec métal d'apport sous forme de fil a été identifié comme le plus pertinent pour s'adapter à la finesse de la soudure. Les premiers essais ont été effectués dans un aquarium pour mettre au point la tête de soudage et le mode opératoire de soudage, avant d'immerger le banc d'essais à 10 m de profondeur. En l'absence de référentiel technique de qualification, une méthodologie et un domaine de validité en profondeur ont été construits : qualification à 10 m de profondeur pour pouvoir valider la mise en œuvre du procédé à 12 m (influence du paramètre pression sur le comportement du bain de fusion et la géométrie de la soudure).



Partie 3

Après une centaine d'essais réalisés en aquarium, dont les résultats étaient positifs mais néanmoins sans marge de manœuvre, nous sommes passés aux essais et à la qualification à 10 m de profondeur, sous la pression du

planning du projet. À ce moment-là, la probabilité d'obtenir une soudure conforme était inférieure à 50 %. Sans grande surprise, la qualification a échoué et a mis en évidence de grandes difficultés, voire l'impossibilité d'extraire la tête de soudage en cas de collage du métal d'apport ou de l'électrode de tungstène dans la cloche de soudage.

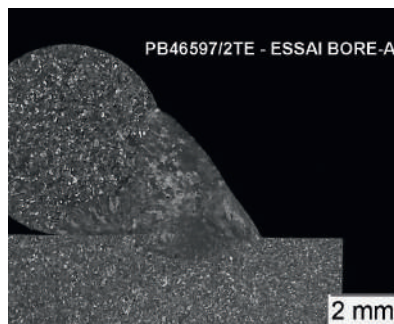
Un point d'arrêt du projet a été décidé, suivi d'une réanalyse complète du procédé de soudage en simplifiant, voire en supprimant, les fonctions impliquant des réglages difficiles à réaliser avant et après immersion de la tête de soudage.



Partie 4

Le doute nécessaire a généré un ensemble de modifications qui ont permis de résoudre toutes les difficultés du procédé, grâce à un travail collectif et à une synergie des compétences (partie 5). Pour ne citer que les modifications les plus significatives :

- remplacement du fil d'apport par un insert fusible installé au préalable sur l'écrou à bloquer en rotation (suppression de la bobine de fil, de la gaine d'amenée du fil, du moteur de dévidage, du guide-fil miniature) ;
- réalisation du bras de la tête de soudage dans un bloc métallique usiné dans la masse pour réduire l'épaisseur de la cloche de soudage à 0,1 mm, de manière à augmenter les jeux fonctionnels et à faciliter la mise en œuvre ;
- intégration d'un fibroscope de diamètre 4 mm destiné à visualiser la scène de soudage à l'intérieur de la cloche de soudage et surtout à orienter la tête de soudage parallèlement à la barrette à souder sur le chapeau (de la dimension d'un bouchon de champagne !) ;
- création d'un porte-électrode double pour pouvoir réaliser la soudure d'un côté ou de l'autre de la barrette (brevet n° 0851805 : Soudage TIG sous eau



↑ Examen macrographique d'une soudure barrette/chapeau réalisée en eau borée.

- ■ ■ à électrode double) sans connaître à l'avance la position de l'insert fusible, qui dépend du serrage de l'écrou;
- conception d'un sécheur à argon permettant de sécher la zone de soudage à l'intérieur de la cloche (température atteinte de 600 °C) : brevet n° 0853643 : Sécheur à gaz sous eau;
- conception d'une unité de pressurisation pour assurer un delta P constant entre la cloche et la pression à la profondeur d'intervention, pendant les phases de descente et de montée de la tête de soudage (une surpression de 0,5 bar suffit à faire éclater les joints d'étanchéité critiques de la tête de soudage).



Partie 5

Nous avons été confrontés à plusieurs savoirs pour mettre au point la machine de soudage et expliquer le comportement de la soudure : le soudage en milieu hyperbare, le soudage en pleine eau, l'influence du bore sur la fissuration à chaud des aciers inoxydables austénitiques, le pilotage des sous-marins (ballastage), la compatibilité électromagnétique dans une installation de soudage avec l'électronique embarquée, en particulier en soudage TIG, le transfert de chaleur par fluide gazeux...



Partie 6

Comme évoqué en partie 3, face à l'échec des options techniques initiales, il a fallu défendre auprès des décideurs qu'une remise à plat complète de la machine était nécessaire pour conserver les briques pertinentes et remplacer les points faibles par des options techniques a priori plus prometteuses, mais sans garantie de réussite. Il faut préciser qu'à ce moment-là, le client final EDF soutenait les orientations alternatives proposées. La qualification finale du procédé a montré que la reconception de la machine et du procédé de soudage permettait d'atteindre un

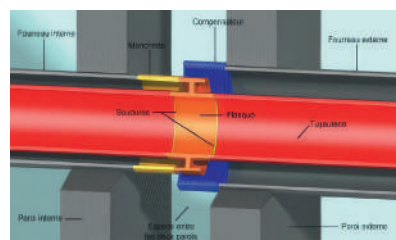
taux de soudures conformes proche de 100 %, avec possibilité de reprise de la soudure, sous réserve de la bonne exécution des opérations préalables au soudage, en particulier la propreté des pièces et le bon serrage de l'écrou sur la vis. Il a été mis en évidence qu'un serrage au couple conforme pouvait conduire à un écrou « libre » si celui-ci n'était pas parfaitement aligné avec la vis (phénomène de coincement) avant serrage. Ce projet n'a pas fait l'objet de communication technique.

Relecture du projet : Réparation des traversées d'enceinte des lignes vapeur du circuit secondaire principal (circuit VVP) du réacteur EPR de Flamanville 3 par soudage robotisé par accès interne – EDF avec la société Westinghouse (2019–2024)

Ce projet constitue le plus gros projet traité au cours de mon activité professionnelle en termes de durée et de budget (à minima 200 fois plus que le premier projet Tigora).

Contexte

Le 19 juin 2019, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) notifie à EDF la nécessité de reprendre certaines soudures de l'EPR de Flamanville 3, dans le circuit secondaire principal, au niveau des traversées vapeur (VVP – Ø 762 × épaisseur 42 mm)¹ qui évacuent la vapeur du générateur de vapeur. Ces soudures sont soumises, par conception, aux exigences d'exclusion de rupture. Elles sont quasiment inaccessibles, se trouvant entre le bâtiment réacteur et le bâtiment de sauvegarde, au milieu d'installations sensibles de plusieurs



↑ Coupe simplifiée d'une traversée VVP. Soudure barrette sur chapeau.

tonnes. Trois scénarios de réparation sont mis en balance et soumis à un jury d'experts EDF/Framatome. Et pourtant, c'est la solution jugée initialement la plus risquée qui est retenue et mise en œuvre avec succès.

Scénario 1

Refabrication à l'identique en appliquant une séquence inverse du montage initial : la réparation des 2 soudures non conformes aux critères implique la destruction et la reprise d'environ 25 soudures pour chacune des 4 traversées. Durée prévue : 4 ans.

Scénario 2

Réparation par l'interparoi entre les 2 enceintes de génie civil : 6 soudures à reprendre pour réparer 1 des soudures non conformes de traversée. Impact fort sur le génie civil et risques élevés de dégrader des parties sensibles (compensateur).

Scénario 3

Réparation robotisée avec accès par l'intérieur de la tuyauterie : pour 2 soudures non conformes réparées, découpe d'un tronçon de tuyauterie et réalisation de 6 soudures. Durée prévue : 2 ans. La première maxime de Descartes, « *prudence* », a conduit à éliminer le scénario 2 dès la première présentation devant un jury de 40 décideurs et experts : le ratio bénéfice/risque a été jugé insuffisant. De même, cette maxime colle assez bien au scénario 1 : a priori, défaire et refaire à l'identique ne devrait pas conduire à de nouvelles inconnues, sauf à considérer la boutade du soudeur : la meilleure soudure est celle qu'on ne fait pas. Le scénario 3 a été jugé, dans un premier temps, le plus risqué par la majorité des membres du jury, par manque de retour d'expérience en France sur les techniques d'intervention par l'intérieur de tuyauterie, même si les résultats des premiers essais de faisabilité montraient une conformité aux critères. Par principe de précaution, le jury a décidé de lancer le

développement des scénarios 1 et 3 en parallèle, en considérant le scénario 3 comme premier choix et le scénario 1 comme solution de repli, sachant que les jalons de *Go/No Go* entre les 2 scénarios étaient compatibles.



Partie 1

Les savoirs en soudage ont été associés dès le début du projet du scénario 3 à la connaissance des contrôles non destructifs avancés (examen UT TOFD et UT multiéléments), en remplacement du contrôle radiographique, très impactant dans le processus de fabrication.



Partie 2

Le soudage robotisé par l'intérieur s'est présenté comme une évidence, après avoir passé 30 ans à développer des machines d'usinage, de soudage et de contrôle UT par l'intérieur de tubes. Cela a été conforté par l'existence d'un retour d'expérience à l'international pour le remplacement de générateurs de vapeur, mais pas en France. Le développement de la solution robotisée a été séquencé par une série d'essais de justification et de qualifications, de difficultés croissantes, sur des maquettes simplifiées puis sur des assemblages représentatifs. L'objectif initial était de réaliser les soudures en 100 % mécanisé. Les premiers essais sur tubes à l'échelle 1 ont montré que la réalisation des passes de racine en soudage mécanisé était possible, mais dépendait de l'expérience des opérateurs soudeurs, surtout sur des chanfreins en V peu adaptés au soudage automatique.



Partie 3

Les difficultés précédentes ont conduit à basculer sur une méthode de soudage mixte : réalisation des 5 premiers millimètres de soudure par soudage TIG manuel, avec des soudeurs entraînés et protégés pour intervenir à l'intérieur de la tuyauterie, à 5 m de distance, dans une ambiance chauffée à 150 °C, puis remplissage de la soudure par procédé TIG téléopéré.



Partie 4

Le déroulement du projet a fait face à des doutes permanents et légitimes sur la qualité de la soudure, à la suite des aléas incontournables rencontrés dans la mise en œuvre de procédés complexes de ce type et mal connus des décideurs. À maintes reprises, il a fallu démontrer et justifier que la meilleure solution était de poursuivre les opérations plutôt que de couper la soudure et de recommencer, soit à la suite d'aléas de préchauffage/postchauffage associés au soudage des nuances en jeu (tube en P355 NH), soit à la suite d'images difficiles à interpréter en contrôle TOFD + UT multiéléments. La 2^e maxime de Descartes a été appliquée : faire un choix raisonné. Ceci a été rendu possible grâce à la synergie des compétences entre experts en soudage, en métallurgie et en contrôle non destructif.



Partie 5

La transversalité des savoirs a été évoquée ci-dessus. Elle a été encore plus prégnante pour les problématiques de préchauffage/postchauffage et de traitements thermiques : l'appel à la simulation numérique, associée à l'expertise d'une équipe d'ingénieurs en thermie et en analyse des phénomènes physiques, a permis de définir les équipements de chauffage, les modes de pilotage des cycles thermiques et la position des capteurs.



Partie 6

Ne pas se laisser influencer par les pressions extérieures a été un leitmotiv tout au long du projet. En termes de communication, il est intéressant de constater que, plus le projet avançait, plus le nombre de

partisans de la solution robotisée et de communiqués de presse internes EDF et grand public augmentait. La mise en œuvre du scénario 3, soudage robotisé par l'intérieur, a été couronnée de succès après 30 mois. La question est de savoir comment le savoir et le savoir-faire acquis seront valorisés pour la construction des prochains réacteurs EPR.

Conclusions

L'examen a posteriori de ces 3 projets selon le filtre cartésien m'amène aux réflexions suivantes :

- l'approche cartésienne reste encore très actuelle dans l'inconscient collectif des chercheurs et ingénieurs : comme Monsieur Jourdain, qui fait de la prose sans le savoir, je constate que de nombreux points du *Discours de la méthode* ont été appliqués de manière inconsciente ;
 - l'approche cartésienne permet de trouver une solution viable, mais basée sur les savoirs antérieurs, validés par les pères : elle ne porte pas de manière intrinsèque les gènes de l'innovation ;
 - l'idée en rupture ou innovante relève plutôt de l'intuition du chercheur. La méthode cartésienne agit comme une alchimie permettant de transformer l'intuition en conviction, puis en solution robuste, en la soumettant à une attitude interrogative permanente. Bien peser la pertinence du « *D'habitude, on fait comme cela. Pourquoi changer ?* »
 - en fin de compte, le bon compromis pour un chercheur innovant ne serait-il pas un intuitif cartésien ?
- Reste à chacun à se tester et à partager ses constats. ☒

Références

- Revue Soudage et techniques connexes – numéro de novembre/décembre 1995 : Machine TIGORA- Le soudage auto-adaptatif dans le nucléaire – EDF/UTO – Comex Nucléaire
- Fifth international conference Computer technology in welding.1994 – Conférence IS/TWI 15 et 16 juin 1994 – Paris – Comex Nucléaire
- ESOPE– septembre 2023 : conférence EPR Flamanville 3 – Réparation des traversées VVP et ARE – EDF/DQI – Westinghouse