

III.1. Introduction

Le choix d'un dispositif de contrôle non destructif passe nécessairement par l'adoption de quelques critères propres à l'entreprise. C'est-à-dire, que sans une étude préalable l'on peut se laisser guider par des pièges classiques (aveuglement, manque d'objectivité, mauvaise gestion des priorités, ...). Ce qui pousse souvent à des pertes considérables, soit du point de vue matériels ou temps.

Les dispositifs de contrôle non destructifs sont multiples et variés et chacun d'eux présente des avantages et des limites comme énuméré dans le chapitre précédent. Sachant que les entreprises ne sont pas dans les mêmes situations (besoins, environnement, gammes de produits, ...). Donc le choix d'un dispositif de contrôle non destructif doit faire l'objet d'une étude de faisabilité et rentabilité.

Ce chapitre sera consacré au choix d'un dispositif de contrôle de CND adapté, ainsi qu'à son implantation au niveau de l'entreprise ALFET. Dans un premier temps on a fait procéder au choix du dit dispositif. Ensuite on a essayé d'établir un cahier de charge fonctionnel afin de spécifier les besoins réels des lignes de productions de l'entreprise en question.

III.2. Étude du marché des CND [15]

Le marché mondial des instruments d'essais non destructifs est évalué à 3690 millions de dollars US en 2017 et atteindra 5500 millions US \$ d'ici la fin de 2025, avec un taux de croissance annuel composé de 5,1% au cours de la période 2018-2025.

Les États-Unis constituent le plus grand marché d'instruments de contrôle non destructif, occupant en moyenne 38,79% des procédures mondiales relatives aux instruments de contrôle non destructif. Viennent ensuite l'Europe et le Japon, qui représentent environ 43% de l'ensemble de l'industrie mondiale. Parmi les autres régions importantes qui jouent un rôle important dans cette industrie, on compte la Chine et certains pays industrialisés.

Dans le souci de trouver un dispositif de contrôle CND adapter au contrôle des produit moulée nous avons jugé utile de faire l'inventaire des offres technologiques sur le marché.

- **Acteurs impliqués:** On trouve: Philips, Westinghouse, Siemens, Hitachi. Sont très présents sur le terrain des brevets. Les acteurs sont nombreux sur chaque créneau.

- **Principaux fabricants mondiaux:** En général des sociétés importantes actives depuis de nombreuses années dans le contrôle non destructif, on a selon l'origine:
 - ✓ **Aux Etats-Unis :** Classé selon le procédé:
 - Physical Acoustics (émission acoustique);
 - Zetec (courants de Foucault);
 - Inframetrics et FLIR Systems (thermographie infrarouge);
 - Magnaflux (ressuage);
 - Panametrics (ultrasons) ;
 - ✓ **En Europe :** Toujours classés selon le procédé:
 - Courants de Foucault: Institut Dr. Förster (D), Staveley Industries (GB);
 - Radiographie: Philips Industrial X-Ray (D); Gilardoni (I); Rich. Seifert & Co (D);
 - Ultrasons : Kräutkrämer (D).
 - ✓ **Au Japon :** Olympus Optical (essais optiques).
- **Principaux fabricants français :** On peut citer:
 - Cegelec, Thomson, Intercontrôle, CIS-Bio, Orphé (leader mondial dans la neutronographie).
 - Acteurs impliqués en R&D : Framatome, Aérospatiale, CEA, LETI, EDF, Marine Nationale, GDF, LCPC, CETIM, Air France, Irsid, Michelin, Turbomeca ...
 - Mais aussi une trentaine de PMI.
- **Principaux prestataires de services en France :** Apave, CETEHOR, CTE (Contrôles Tests, Expertises), Framatome Centre Technique, Institut de Soudure, Intercontrôle, SGS Qualitest, Sirac, Sofratest...
- **Principaux pôles de compétences français :**
 - **Centres techniques et laboratoires d'essais:** CETIM, LNE, CEA-LETI (pour le secteur du nucléaire civil). On dénombre en France plus de 150 intervenants (fabricants, prestataires de services, centres de compétences dans le domaine du CND).
 - **Organisations professionnelles:** COFREND (COntédération FRançaise des Essais Non Destructifs. Organisme national de référence, promeut les recherches des laboratoires et des fabricants

de matériel, coordonne les actions de normalisation et sanctionne par une certification l'aptitude des opérateurs à mener des essais non destructifs. Organise également des journées nationales d'information tous les 3 ans et publie un journal trimestriel.

III.3. Élaboration du cahier de charge [16]

Le cahier des charges fonctionnel doit permettre d'apporter une réponse à un problème évoqué en termes de besoin, sous forme d'un produit. L'objectif étant d'obtenir la proposition la plus apte à rendre le service attendu. Il doit ainsi permettre:

- D'orienter la recherche de la solution optimale du produit d'un point de vue technico-économique.
- De favoriser le dialogue entre partenaire.
- D'utiliser les techniques et les technologies récentes.
- De renforcer l'innovation.

Selon **AFNOR** le cahier des charges est définit comme l'expression fonctionnelle du besoin. Pour l'élaboration d'un cahier des charges fonctionnelles les étapes à suivre sont:

- 1) **Détection du besoin:** Pour mieux détecter le besoin nous avons utilisé la méthode QQOCCQP qui consiste à répondre aux 7 questions à savoir : **Qui ? Quoi ? Où ? Comment ? Combien ? Quand ? et Pourquoi ?**

Tableau III.1 : Méthode QQOCCQP.

Questions	Description	Combien	Pourquoi
Qui ?	- Le service maintenance - Service qualité	- Plusieurs	- Implantation - Utilisation
Quoi ?	- Contrôle les produits moulée	- Plusieurs contrôles	- Pour garantir la qualité des produits
Où ?	- Laboratoire - Sur les chaines de production	-Plusieurs	- Pour tous les produits fabriqués dans l'entreprise
Comment ?	- Procédé ultrasonique	- Trois (3)	- L'ultrason est la méthode la mieux adaptée.
Quand ?	- Pas de réponse	- Pas de réponse	- Pas de réponse

En effet, le but de cette partie est de bien poser le problème et aussi c'est dans cette partie qu'on doit se mettre d'accord sur la définition et l'étendue du problème.

Dans notre cas, il est évident que le problème a été bien visé, c'est la détection d'un procédé de contrôle fiable. Car après une discussion avec le personnel du service qualité, on s'est mis d'accord que l'inexistence d'un moyen de contrôle fiable. Cela se fait sentir lors de la demande par un potentiel client de la fiche technique de CND du produit.

2) Analyse fonctionnelle globale (AFG): L'analyse du besoin passe par deux étapes, à savoir: la verbalisation du besoin et la validation du besoin. Ces deux étapes doivent être effectuées avec le concours de toutes les entités agissant d'une manière directe ou indirecte sur ce dispositif.

a) La verbalisation du besoin : La solution adoptée pour verbaliser le besoin, bien qu'il existe plusieurs, est la « *Bête à corne* », basée sur trois questions qui sont :

- A qui le dispositif rend-il service ? ;
- Sur quoi le dispositif agira-t-il ?
- Dans quel but ?

On répondra à ces questions en fonction des données de l'entreprise.

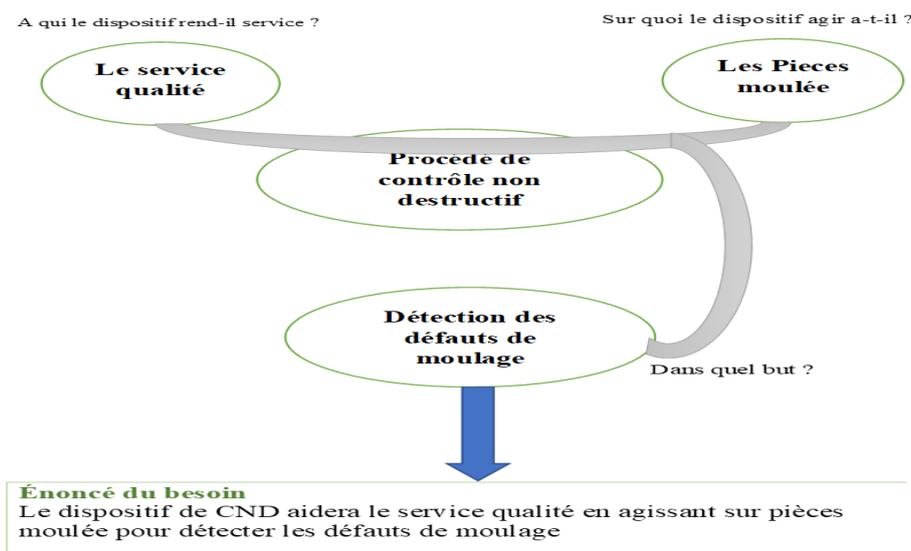


Figure III.1. La bête à corne.

Cette technique d'énonciation du besoin nous a permis de bien cerner le besoin de l'entreprise dans sa quête à garantir la qualité et la fiabilité des produits grâce à un dispositif de CND.

a) **Validation du besoin** : Le besoin fondamental sera validé s'il existe une réponse aux trois questions suivantes :

- Pourquoi ce système existe-t-il ?
- Pour quoi ce besoin existe-t-il ?
- Qu'est ce qui pourrait faire disparaître ce besoin ?

A ce niveau les réponses sont les suivantes :

- 1- Parce que les clients potentiels de l'entreprise cherchent une certaine garantie sur la fiabilité des produits (Poulies, Bobines, Assiettes de Disque, ...).
- 2- Pour contrôler la structure complète des produits.
- 3- Ce besoin est très important pour l'entreprise car son absence dans les lignes de production affecte négativement son marché industriel.

3) Analyse Fonctionnelle du Besoin : L'Analyse Fonctionnelle du Besoin est appelée ainsi, car, elle va permettre de traduire le besoin par des fonctions à réaliser: Les Fonctions de Service[16].

L'analyse fonctionnelle du besoin est aussi appelée *analyse fonctionnelle externe*. Elle nous permettra d'élaborer le cahier des charges fonctionnelles.

a) **Diagramme PIEUVRE** : Il faut généralement plusieurs fonctions de service pour répondre au besoin qui s'exprime sous forme d'une fonction globale. Le diagramme "**PIEUVRE**", permet d'identifier les fonctions de service d'un produit.

On essaye de traduire les relations entre le produit et le milieu extérieur (inter-acteurs) [16].

Le diagramme de la **Figure (III.2)** représente l'appareil de CND et les éléments du milieu extérieur qui agissent sur lui.

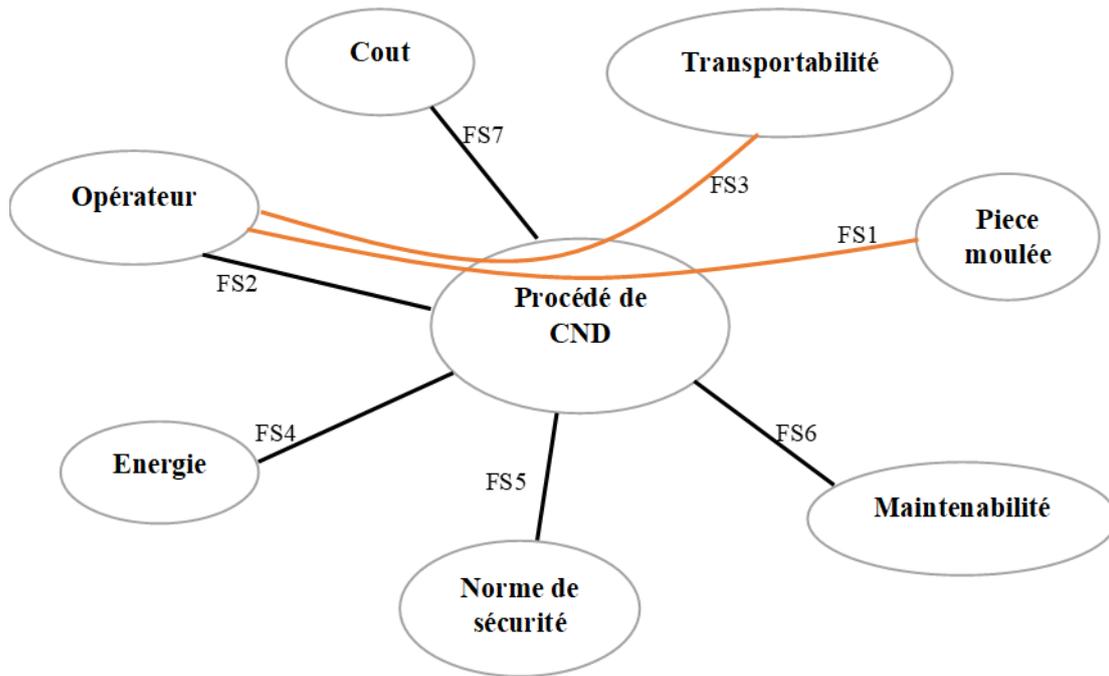


Figure III.2. Diagramme *PIEUVRE* d'un dispositif CND .

b) *Énoncé des fonctions de services* : Il existe sept (7) éléments de services:

FS1 : Permettre à l'opérateur de détecter les défauts des pièces moulées.

FS2 : Donner à l'opérateur un résultat utilisable.

FS3 : Doit être facilement transportable par l'opérateur.

FS4 : S'adapter à l'énergie disponible.

FS5 : Doit satisfaire les normes de sécurité en vigueur.

FS6 : Doit être facilement réparable en cas de défaillance.

FS7 : Avoir un coût d'implantation satisfaisant.

4) **Cahier des charges fonctionnelles CdCF** : [17] On appelle cahier des charges fonctionnel (*CdCF*), le document par lequel le demandeur exprime son besoin (ou celui qu'il est chargé de le traduire) en terme de fonctions de service et de contraintes. Pour chacune des fonctions et contraintes, sont définis des critères d'appréciation et leurs niveaux. Chacun de ces niveaux est assorti d'une flexibilité.

Dans cette partie on va établir :

- Les critères d'appréciation;
- le niveau et la flexibilité des fonctions de service déjà établies, pour trouver un produit satisfaisant.

Tableau III.2: Élaboration du cahier des charges fonctionnelles.

Fonction de service	Critères d'appréciations	Niveau	Flexibilité
FS1	- Détection des défauts surfacique.	Norme de contrôle CND	1
	- Détection des défauts volumétriques		0
	- Contrôle les grand pièces		0
FS2	- Facilité l'interprétation des graphes		0
	- Archivage des résultats		0
FS3	- Poids	Léger	1
	- Volume		1
	- Encombrement		1
FS4	- Electrique - Voltage : 90-230 V		1
FS5	- Protection contre les chocs électriques		0
	- Indication du niveau de protection		0
	- Ne pas générer d'agression ultrasonore.		0
FS6	- Disponibilité des pièces de rechange	A définir par l'acheteur	0
	- Organisation du SAV		2
	- Durée contractuelle		0
FS7	A définir par le fournisseur	Acceptable pour l'entreprise	0

0 : Impératif. 1 : Performance souhaitable. 2 : Liberté de proposition

III.4. Choix d'un procédé de CND

Pour faire un choix, il est indispensable de disposer de quelques critères d'appréciations concernant les solutions trouvées. Dans notre cas, il s'agit de choisir un procédé de CND parmi les procédés déjà énumérés dans le *chapitre II*.

Ainsi dans cette partie on a fait dégager les différents critères liés aux contrôles non destructifs et par la suite on a utiliser les outils d'aide aux choix comme : Le tableau avantage et inconvénient; la méthode FARE, la grille multicritère; Dans le but de faire un choix satisfaisant à l'entreprise.

III.4.1. Critères de choix d'un procédé CND:[13]

En amont du contrôle, le choix d'une méthode optimale de CND, c'est-à-dire la mieux adaptée au problème posé, est essentiel. Dans le cas de la recherche de défauts, le choix doit se faire en prenant en compte les caractéristiques générales du couple « pièce-défaut », ainsi que celles de l'environnement.

Le choix du procédé de contrôle s'effectuera grâce à un recensement de données réelles des lignes de production des pièces. Les données liées à la gamme de produit de l'entreprise ALFET et les types des défauts recherchés. Dont on peut citer:

- Poids des pièces produites variant entre 10Kg à 17T pour les pièces en fonte et entre 150gr à 2T pour les pièces en acier.
- La nature des matériaux utilisés est de très grande variété de nuances de métal ferreux (plus de 50 nuances). Reste à savoir si toutes les pièces réalisées sont ferromagnétiques ou non et si elles sont conductrices de l'électricité ou non.
- Les types des défauts dans les chaînes de production sont de types: Surfacique, volumique, gros, petit, ponctuel, internes,

III.4.2. Choix suivants les avantage et inconvénient:

Un simple tableau à double entrée permet de faire l'inventaire des avantages et des inconvénients de toutes les techniques du CND en fonction du types de défauts recherchés. Cela permettra d'analyser le tableau et d'en avoir la solution convenable.

Le choix du procédé va se baser sur les avantages et les limites de chaque procédé de contrôle non destructif et va nous permettre de faire une sélection préliminaire des procédés à retenir pour le contrôle de la qualité des produit. L'examen visuel étant exécuté quel que soit la classe ou la qualité de la pièce. Donc il ne fait pas partie des éléments de cette comparaison. Le tableau (III.1) résume les avantages et les inconvénients de chaque procédé.

Tableau. III.3 : Comparaison entre les différents procédés CND.

Méthode de CND	Défauts détectés	Application	Point fort	Point faible
Ressuage	Défauts débouchant	- Contrôle manuel de tous produits à surface accessible	- Simplicité - Faible coût	- Nécessite des surfaces propres

Magnétoscopie	- Défauts fins - Débouchant - Sous-cutanés	-Matériaux ferromagnétiques - Aciers / Fontes	Sensibilité	contrôle limité aux pièces ferromagnétiques
Courant de Foucault	- Défaut de surface - Caractérisation de la microstructure des matériaux	Matériaux conducteurs	Grande sensibilité de détection et rapide	Faible pénétration dans la matière
Radiographie	Défauts internes	Contrôle en atelier et sur site de tous matériaux	Cartographie Souplesse de réglage	L'utilisateur est exposé aux radiations
Ultrason	Défauts internes Défauts débouchant	Contrôle manuel ou automatique de la majorité des matériaux	Localiser le défaut dans le volume de la pièce	
Thermographie infrarouge	Délaminations, hétérogénéités diverses	Les pièces métallique	Méthode globale et rapide	Profondeur de contrôle limitée (qq mm)

L'analyse du Tableau (III.1) consiste à faire une sélection du ou des procédés qui sont les mieux adaptées pour le contrôle des pièces produites par moulage.

Les procédés suivants : *Le ressuage; le courant de Foucault; la magnétoscopie; thermographie*. Sont des procédés qui permettent de détecter des défauts débouchant (défauts de surface). Néanmoins, la magnétoscopie et la thermographie peuvent détecter des défauts sous cutanés, pouvant aller jusqu'à quelque micromètre de profondeur.

Le but étant de détecter en plus des défauts surfaciques, les défauts volumétriques. Ces procédés présentent une certaine insuffisance en ce qui concerne les défauts en profondeur d'où leurs éliminations parmi les alternatives qui se présente à nous.

Alors que pour : *La radiographie et l'ultrason* sont des procédés permettant la détection des défauts volumétriques en profondeur. Ils peuvent aussi détecter quelque défaut de surface.

Ces deux méthodes sont compatibles avec le problème de la détection des défauts internes des pièces moulées.

Le Tableau (III.2) représente les méthodes de CND les plus adaptées avec les défauts de moulage.

Tableau. III.4 : Procédés de CND pour détection des défauts de moulage.

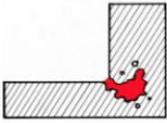
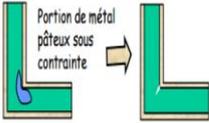
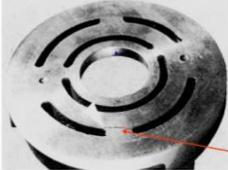
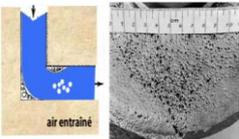
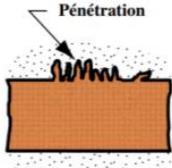
Les défauts de moulage	La cause du défaut	Détection						
		V T	P T	M T	E T	U T	R T	I T
 <p>Retassure d'angle</p>	Cavités ouvertes ou fermées à contours rugueux, localisées dans les dernières portions de métal solidifié. Elles sont dues aux contractions de volume subies par le métal liquide au cours de la solidification.						×	
 <p>Retassure ouverte</p>		×						
 <p>Retassure borgne</p>						×	×	
 <p>Portion de métal pâteux sous contrainte</p> <p>Criquer (fissures)</p>	Il s'agit d'une déchirure à chaud qui se produit au cours de la solidification en présence de contraintes mécaniques. Elle se développe généralement dans les parties chaudes.		×	×	×	×	×	
 <p>Les tapures</p>	Il s'agit d'une déchirure qui se produit au cours du refroidissement du solide, en présence de contraintes mécaniques. Elle se développe généralement dans les parties encore chaudes et est due à une contraction thermique.		×	×	×	×		
 <p>air entraîné</p> <p>Les soufflures</p>	Ce sont des cavités internes ou externes provoquées par un dégagement gazeux à travers l'alliage encore liquide.					×	×	×
 <p>Pénétration</p>	quand le métal coulé est très fluide, il peut pénétrer dans les porosités du sable. La surface de la pièce est un mélange de métal et de sable.		×	×		×	×	

Tableau. III.5 : Nomenclature des différentes techniques de CND.

Méthode CND	Symbol
Examen visuel	VT
Ressuage	PT
Magnétoscopie	MT
Courant de foucault	ET
Ultrasons	UT
Radiographie	RT
Thermographie	IT

Le Tableau (III.4) présente la comparaison entre les différentes méthodes de CND par les critères: *Défectologie* , *Caractérisation*, *Métallique*, *forme complexe*, *la structure* .

Tableau. III.6 : comparaison des techniques de CND.

Méthodes de CND	Défectologie	Caractérisation	Métallique	Forme complexe	La structure
VT	*		*		
PT	*		*		
MT	*		*		
ET	*	*	*		
IT	*		*	*	*
UT	*	*	*	*	*
RT	*		*		

A travers Tableau (III.4), on en conclut aisément que le procédé par ultrasons (UT) répondent au mieux aux objectifs recherchés.

III.4.3. Choix suivant la méthode FARE:

Les solutions sont analysées dans un tableau de compatibilité selon quatre critères qui sont: **Faisabilité, Acceptabilité, Rentabilité, Efficacité** ; d'où son nom la méthode **FARE**.

Dans notre cas, chaque procédé sera noter par:

'+' : s'il remplit le critère;

'-' : s'il ne remplit pas le critère.

Le procédé qui aura le plus grand nombre de '+' sera adopté comme la solution propice à notre problème. Ces notations sont faites en accord avec le personnel (chef méthode contrôle, le contrôleur en chef du hall, directeur qualité) du service qualité et de la production. Le Tableau (III.5) donne l'application de la méthode.

Tableau III.7 : Évaluation des procédés CND par la méthode FARE.

Critères \ Solutions	Faisable	Acceptable	Rentable	Efficace
Ressuage	-	-	+	-
Magnétoscopie	-	-	+	-
Courant de Foucault	-	-	+	-
Ultrason	+	+	+	+
Radiographie	+	-	-	+
Thermographie	+	-	-	+

L'analyse du tableau en fonction de cette méthode montre clairement que le procédé par ultrason obtient le grand nombre de '+'.

Alors il sera le mieux convenable à l'entreprise.

III.4.4. Choix suivant le tableau multicritère:

La méthode multicritère permet d'obtenir une évaluation chiffrée. Pour tenir compte de l'importance des différents critères, il est possible d'attribuer un barème pour chaque procédé vis-à-vis du critère. Le barème ci-dessous sera utilisé sur une note de **0 à 5**:

- a) **0 à 1** : Signifie que la technique n'est pas applicable ou très mal adaptée;
- b) **2 à 3** : Signifie que la technique est utilisable dans des cas particuliers;
- c) **4 à 5** : Signifie que la technique est bien adaptée.

Chaque solution obtient ainsi une note, ou un score. La solution choisie sera celle qui obtiendra le score le plus élevé.

Tableau III.8 : Méthode multicritère des procédés CND.

Procédé Critères	Ressuage	Magnétoscopie	Courant de Foucault	Ultrason	Radiographie	Thermographie
Pièces en aciers	5	5	5	5	5	5
Pièces en fontes	5	0	0	5	5	5
Défaut volumétrique	0	3	1	5	5	3
Grandes pièces	0	0	0	5	4	5
Contrôle sur site	0	0	0	5	3	5
Coût	5	4	4	3	1	1
Sécurité	3	3	1	5	1	4
Total	18	15	11	33	24	28

A travers le Tableau (III.6), on voit bien que l'ultrason a obtenu la plus grande note. Cela présume qu'il est le mieux adapté.

III.5. Analyse des résultats

D'après les trois méthodes de sélection utilisées, auparavant pour la détermination de la technique de CND la plus adaptée à notre cas d'étude, on a les résultats suivants :

- *Le tableau avantage et inconvénient* : Nous avons obtenu deux procédés qui répondent aux critères imposés, qui sont l'**ultrason** et la **radiographie**.
- *La méthode FARE*: Cette méthode nous a donné clairement le procédé par ultrason comme solution à opter.
- *La méthode multicritère*: Cette méthode nous a confirmé le choix obtenu par la méthode FARE, c'est-à-dire l'ultrason.

Donc sur l'ensemble des évaluations faites des procédés de contrôles non destructifs et en fonction des critères liés aux produits de l'entreprise **ALFET** la solution la plus efficace et la plus apte est le procédé par **Ultrason**.

L'ultrason connaît une très grande évolution. De nos jours à travers des techniques les plus adoptées comme le **TOFD** qui est l'acronyme de "**Time-of-Flight Diffraction**"; c'est-à-dire "**mesure du temps de vol de l'onde diffractée**". Le phénomène de diffraction existe dans tous les contrôles par ultrasons classiques mais comme l'amplitude de cette onde diffractée est très faible (environ 6% de moins qu'une onde réfléchie), elle passe inaperçue.

Cette technique consiste à mesurer le temps de parcours du plus court chemin de l'onde ultrasonore émise par le palpeur d'émission, en passant par le sommet d'un défaut plan qui à cet endroit émet une onde diffractée arrivant au palpeur de réception. De plus cette méthode permet de réaliser l'équivalent d'une radiographie sans les inconvénients liés à l'utilisation des **rayons X**.

Il existe d'autres procédés comme: l'analyse **ultrasonore multiéléments**; l'analyse **acoustique**, qui sont aussi efficaces pour la détection des défauts recherchés.

Dans la suite de notre travail nous allons faire une étude minutieuse, dans la mesure du possible et selon nos moyens, du marché des CND pour connaître l'étendue des offres, puis nous allons établir un cahier de charges techniques pour bien spécifier les besoins de l'entreprise dans le but de choisir un appareil **ultrason** qui répond ses exigences.

III.6. Implantation du dispositif

Ici, il s'agit de faire une étude concernant les points de contrôle sur les processus de fabrication des pièces moulées, c'est-à-dire, les endroits où on doit installer l'appareil pour une meilleure utilisation.

Suite aux enquêtes menées dans les chaînes de productions de l'entreprise. On a pu trouver une solution favorable pour un contrôle CND à savoir:

- Un appareil ultrason portative pour contrôler les grandes pièces.
- On a choisi deux postes de contrôle dans chaque ligne de production.
 - ✓ Atelier parachèvement : Contrôle des pièces après ébarbage et avant le traitement thermique, puisse ce que si on détecte un défaut, la pièce ne passe pas à la phase de traitements thermiques.
 - ✓ Atelier d'usinage : le contrôle du produit fini après usinage pour s'assurer de sa qualité.

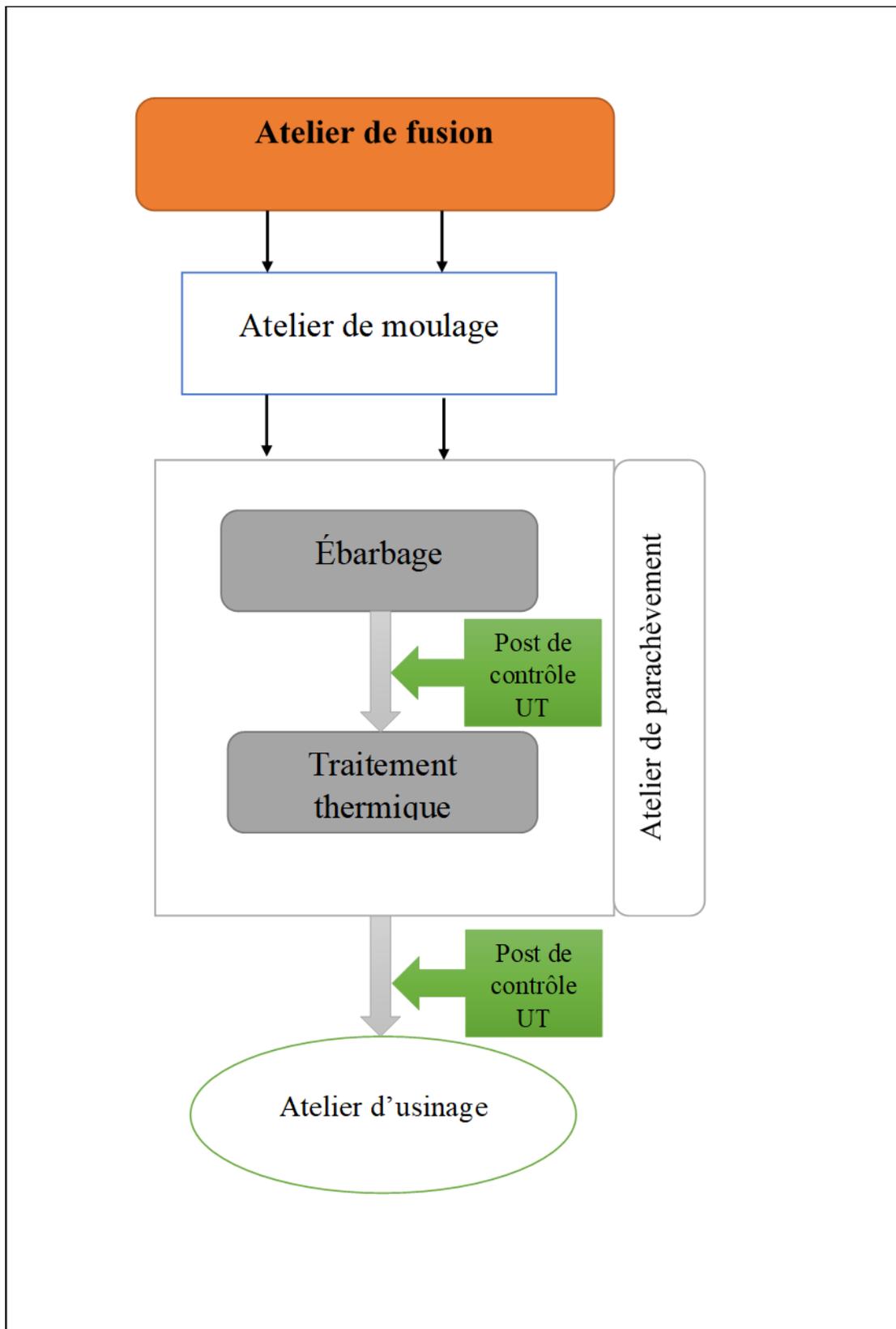


Figure III.3. Emplacement des points de contrôles par ultrason.