



HAL
open science

LE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF et la contrôlabilité des matériaux et des structures

Gilles Corneloup, Cécile Gueudré

► **To cite this version:**

Gilles Corneloup, Cécile Gueudré. LE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF et la contrôlabilité des matériaux et des structures: Introduction aux CND. LE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF et la contrôlabilité des matériaux et des structures, 2016, 978-2-88915-002-1. hal-01430272

HAL Id: hal-01430272

<https://hal.science/hal-01430272>

Submitted on 10 Apr 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INTRODUCTION AUX CND

Le *contrôle non destructif (CND)* regroupe un ensemble de méthodes qui ont pour but général de contrôler un objet sans le modifier. On peut les classer selon les phénomènes physiques mis en jeu: acoustiques (ultrasons, émission acoustique), rayonnements (visuel, radiographie X, γ , tomographie, neutronographie, thermographie infrarouge), flux de matière (ressuage, étanchéité), champs électromagnétiques (magnétoscopie, courants de Foucault).

Le métier du CND s'est historiquement construit autour des activités nucléaires (1950-80), puis celles de l'aéronautique (1980-2000) lorsque les matériaux composites sont apparus. Dernièrement (2000-2010), une nouvelle demande concerne la caractérisation du béton (ouvrages d'art et aussi enceintes de confinement). Ces besoins (fig. 1.1) sont toujours présents, ainsi que de nombreuses autres demandes d'applications industrielles et de R&D, parfois extrêmement complexes.



Figure 1.1 Quelques besoins importants de CND.

Chaque méthode de CND regroupe un ensemble de différentes techniques spécialisées (par exemple ultrasons focalisés, ou générés par laser, etc.). D'une façon générale, on compare l'évolution des grandeurs physiques entre une pièce réputée saine, à l'échelle de la mesure, et une pièce présentant un défaut. La coexistence de ces différentes méthodes est justifiée par le fait que les caractéristiques générales de l'objet à contrôler peuvent être très variées.

Il peut s'agir de pièces mécaniques vitales ou non, fabriquées à l'unité comme en grande série, réalisées par usinage, soudage, collage, etc. Les matériaux constitutifs sont métalliques ou non, ferromagnétiques ou pas, à l'échelle du millimètre ou du mètre, et l'environnement (température, milieu sous-marin, rayonnement, inaccessibilité, etc.) est quelquefois hostile. Une automatisation du contrôle est parfois nécessaire, et l'important problème de la fourniture puis de la conservation d'une preuve du contrôle se pose de façon permanente.

Les différentes méthodes de contrôle non destructif ont classiquement deux objectifs différents mais souvent complémentaires: la recherche de défauts macroscopiques à l'échelle de la mesure (on réservera dans ce document l'appellation CND à cet objectif) et la caractérisation globale de matériaux ou de pièces (on parlera d'*END, Evaluation Non Destructive*).

Dans le premier cas, on garantit la qualité de la pièce par la preuve de l'absence de défauts, microstructuraux ou non. Le contrôle se fait éventuellement en plusieurs étapes: après l'indispensable opération de détection des événements susceptibles d'être des défauts, on peut être amené, après analyse, à les identifier (localisation, forme surfacique ou volumique, dimensions) pour en déduire leur degré de nocivité.

Dans le second cas, on recherche plutôt certaines caractéristiques globales du matériau, tels que les réponses élastiques, l'état de contrainte, l'homogénéité, ou des paramètres géométriques telles que l'épaisseur de la pièce, ou d'une couche superficielle. Ces contrôles peuvent s'effectuer en suivant l'évolution relative d'un paramètre physique, comme en recherche de défauts, mais souvent la mesure absolue est nécessaire.

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.

Ainsi, le contrôle par ultrasons est très souvent utilisé car il présente des avantages intrinsèques certains comme, par exemple, la facilité de mise en œuvre, la non accessibilité obligatoire aux deux faces d'une pièce (fig. 1.2), la bonne adaptation aux orientations naturelles de la plupart des défauts, etc. Mais il a aussi des inconvénients majeurs, comme la nécessité de coupler le transducteur à la pièce, ou la très grande sensibilité de la propagation des ultrasons aux degrés d'hétérogénéité ou d'anisotropie du matériau.

Dans un contexte de qualité qui impose la recherche et l'identification de défauts toujours plus petits, sur des matériaux de structure (acier austénitique, matériau composite, béton, etc.) de plus en plus complexes, ces limites intrinsèques peuvent entraîner des difficultés de contrôle parfois insurmontables. Le terme « *matériaux de structure* » est employé ici pour qualifier des matériaux réels dont la réponse au contrôle n'est pas équivalente à celle d'un matériau parfait. Cette convention est classiquement utilisée dans le domaine du CND.



Figure 1.2 Contrôle ultrasonore d'une aile d'avion (SOFRANEL)

La détection des défauts peut ainsi s'avérer difficile, voire impossible à cause notamment d'un rapport signal, porteur d'informations, sur bruit, qui se dégrade.

Dans ces conditions, il n'est plus possible de trouver la forme et la dimension du défaut, et la qualité de la pièce n'est pas prouvée. Un surdimensionnement de la structure doit donc être introduit, au niveau de la conception. Il ne suffit malheureusement pas à éliminer le problème en cas de défaut évolutif, il ne fait que le retarder. Ce problème général de détection, évoqué pour les ultrasons, concerne chaque méthode de CND.

On comprend donc qu'en amont de tout contrôle non destructif, le choix de la méthode la mieux adaptée au problème posé est essentiel. Donner les outils pour répondre à ce besoin complexe est l'objectif de ce livre.

Cet ouvrage souhaite donc être exhaustif dans l'identification des paramètres à prendre en compte pour résoudre un problème de CND concret posé. Ces paramètres sont définis et les seules limites théoriques nécessaires, pour choisir la méthode optimale de CND, sont présentées. Les approfondissements

supplémentaires seront déclinés, pour chacune des méthodes de CND, dans des ouvrages spécifiques à venir, qui s'intégreront dans une collection complète « METIS NDT » .

Dans les chapitres 1 et 2, on présente donc les paramètres majeurs à prendre en compte pour choisir la meilleure méthode de CND, ou d'END (Evaluation Non Destructive). Il est en effet indispensable de bien connaître la pièce, et l'éventuel défaut, pour contrôler de façon pertinente. Cette première partie permet de se familiariser avec la logique guidant le choix de la méthode optimale de CND. L'analyse des conditions d'apparition des différents défauts possibles, selon le type de matériau ou de structure, leur mode d'obtention ou d'endommagement, est traité de façon complète. Des conclusions concernant la contrôlabilité des matériaux et des structures sont avancées.

Les différentes méthodes de CND sont présentées ensuite, dans les chapitres 3 à 12. On y trouve notamment les dix méthodes de contrôle définies par la norme NF EN ISO 9712, chacune étant symbolisée par deux lettres, acronymes de l'appellation anglaise (cf. Annexe A). On envisage à chaque fois les principes physiques, la technologie et les matériels de contrôle, les méthodes de mise en œuvre, et on illustre avec différentes applications. Pour discuter des potentialités de ces méthodes, les approfondissements actuels sont montrés. Les techniques industrielles classiques sont abordées, ainsi que les méthodes qui correspondent à un besoin particulier, et/ou d'usage limité ou spécialisé, et/ou qui n'ont pas de certification.

Le chapitre 13 est consacré à l'exposé des facteurs pouvant dégrader les mesures de CND, affaiblir les amplitudes par exemple, et donc fausser éventuellement les diagnostics. De manière générale, on introduit la notion de bruit de structure (donc de rapport signal sur bruit), en prenant des exemples en ultrasons, courants de Foucault... Les paramètres environnementaux (température, ...) sont également considérés.

Le chapitre 14 discute de solutions, notamment des progrès réalisés en modélisation des phénomènes, en optimisation par inversion. Il propose également des traitements a posteriori des informations obtenues (signal, image), voire de la fusion de données. Il est aussi abordé comment la prise en compte de règles de « bonne pratique » de CND, dès la conception des structures industrielles, permet de gagner en performance et coût de contrôle : c'est la notion de RC-CND.

A la fin de chaque chapitre, une bibliographie recense les principaux documents à consulter, pour aller plus loin dans le détail des points abordés, et des perspectives développées.

Cet ouvrage est à plusieurs niveaux de lecture : il est appréhendable aussi bien par ceux qui découvrent les CND que par les professionnels confirmés. Dans cette catégorie, les certifiés de niveau 2 trouveront naturellement les informations nécessaires à l'exercice de leur métier, mais ce document intéressera davantage les niveaux 3 toutes méthodes et « 4 » (niveau que l'on peut utiliser pour les personnes faisant de la R&D), pour les aider à faire les choix optimaux en termes de CND.

L'ouvrage présente également un grand intérêt pour les étudiants de Licence, Master, et/ou Doctorat pour aborder cet axe de recherche, en comprendre les limites et potentiels, afin de développer de nouvelles méthodes de CND, ou de mettre au point et utiliser des expérimentations non destructives pour leurs travaux.

Ce travail a été réalisé grâce à la collaboration de nombreux spécialistes et experts du domaine, industriels, chercheurs ou enseignants-chercheurs. Certains ont apporté leurs contributions écrites (publications, conférences, et souvent documents de cours de formation initiale, ou professionnelle), et tous ont été interviewés. De nombreuses réunions ont eu lieu pour échanger nos points de vue. Ceci nous a permis de rédiger cet ensemble de 14 chapitres qui prend en compte à la fois les très vastes connaissances spécifiques à chaque méthode, et à la fois une ligne éditoriale simple et claire.

LE CONTROLE NON DESTRUCTIF
et la contrôlabilité des matériaux et des structures,
par Gilles CORNELOUP et Cécile GUEUDRE, PPUR, 2016

Pour leur investissement personnel dans cet ouvrage, nous tenons ainsi particulièrement à distinguer et à remercier les personnalités suivantes (les collaborations spécifiques sont rappelées en regard des chapitres correspondants), avec une pensée toute particulière pour Jean-Michel FIEFFE, qui nous a malheureusement quitté en début d'année:

Francis CASADO	Cegelec Ndt	Jean-François CHAIX	Amu/Lma
Michel DESCOMBES	Insavalor	Jean-Michel FIEFFE	Sirac
Nathalie GODIN	Insa Lyon	Yves JAYET	Insa Lyon
Jean-Michel LETANG	Insa Lyon	Joseph MOYSAN	Amu/Lma
Marie-Aude PLOIX	Protisvalor/Lma		

Nous avons eu également de nombreux échanges fructueux avec d'autres personnalités reconnues dans le domaine du CND, et nous remercions vivement également, pour ces discussions pertinentes :

Michel ALLOUARD	Snecma	Philippe BENOIST	M2m
Olivier CASSIER	Sofranel	Philippe DUBOIS	Extende
Jean-Claude GANDY	Sgs Qualitest	Philippe GUY	Insa Lyon
Pierre HUSARECK	Sofranel	Isabelle MAGNIN	Creatis
Thomas MONNIER	Insa Lyon	Marc PEYROT	Insavalor
Christian VENTURE	Sgs Qualitest		

Cet ouvrage est illustré par des photographies de grande qualité, que de nombreuses sociétés nous ont autorisés à reproduire. Nous remercions de cette collaboration, et pour leur soutien, les entreprises suivantes :

ACTEMIUM	AIRBUS INDUSTRIE	ANAïs
AREVA	ATEM	BALTEAU
CEA	CETIM	CIE
CNDR La Réunion	DASSAULT AVIATION	COFREND
DUNOD	EDF R&D	EXTENDE
IFAT	FORCES ARMEES CANADIENNES	
INDUSCOPE	GROUPE INSTITUT DE SOUDURE	
KEM ONE	HOWDEN BC COMPRESSORS	
LAVOISIER	M2M	MISTRAS
NTB	OLYMPUS	OMIA
RTE	SAFRAN-SNECMA	SAUTER
SGS QUALITEST	SOFRANEL	SREM
TESTO	VIDISCO	YXLON
ZEISS		

ainsi que les Universités et Ecoles : AIX-MARSEILLE UNIVERSITE, INSA LYON, IUSTI, IUT AIX-MARSEILLE, IUT NÎMES, MINES DOUAI, MINES PARISTECH.

Nous remercions tout particulièrement la COFREND qui nous a permis d'utiliser sa connaissance du milieu professionnel des Essais Non Destructifs, avec laquelle nous avons pu notamment chiffrer au chapitre 1 la réalité du métier de contrôleur.

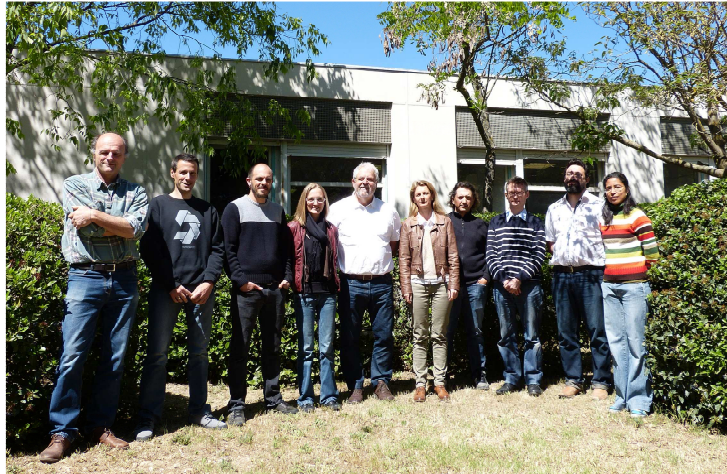
Ce manuscrit s'appuie sur l'expertise acquise au cours des études menées au laboratoire LCND (Laboratoire de Caractérisation Non Destructive, Université Aix-Marseille) depuis sa création en 1989, dont l'axe principal de recherche concernait « le contrôle et la caractérisation non destructive des matériaux

LE CONTROLE NON DESTRUCTIF
et la contrôlabilité des matériaux et des structures,
par Gilles CORNELOUP et Cécile GUEUDRE, PPUR, 2016

et structures réels ». Les collègues membres permanents du LCND ont donc très largement contribué à cet ouvrage : Joseph MOYSAN, Ivan LILLAMAND, Jean-François CHAIX, Marie-Aude PLOIX, Vincent GARNIER, Cédric PAYAN.

Un très grand merci à vous tous, qui nous avez aidés, que ce soit dans l'élaboration des chapitres, dans les échanges pour mieux cerner les potentiels des méthodes de CND, ou dans la recherche de photos pertinentes. Et une « spéciale dédicace » à Marie-Aude PLOIX, qui a collaboré sur les deux derniers chapitres, mais a aussi assuré, entre autres conseils, des relectures particulièrement efficaces.

Photo des membres permanents du LCND, avec de gauche à droite Vincent, Jean-François, Cédric, Marie-Aude, Gilles, Cécile, Ivan, Joseph.



Ainsi que Jean MAILHE et Sandrine RAKOTONARIVO, qui nous ont rejoint depuis 2013.

Depuis 2012, le LCND est rattaché au LMA (Laboratoire de Mécanique et Acoustique, UPR CNRS 7051), dans l'Equipe « Ondes et Imagerie », qui est spécialisée dans la propagation des ondes mécaniques dans les milieux fluides et solides complexes.

Le thème scientifique de l'équipe est transverse et centré sur la modélisation pour les ondes au sens large (simulation numérique, physique, mathématique, calcul haute performance) avec des applications en Contrôle Non Destructif, Ultrasons Médicaux, Acoustique Sous-Marine, Sismique, et Sismologie. Dans ce cadre, l'équipe développe aujourd'hui des recherches visant à imager, caractériser et contrôler de manière non invasive, au moyen des ondes, les milieux naturels, biologiques et manufacturés.

Cet ouvrage est également le fruit d'une longue collaboration avec l'INSA de LYON et INSAVALOR, dont l'origine remonte aux années 1980-90 avec l'une des premières thèses de doctorat en CND (Gilles CORNELOUP) dans le cadre d'une formation doctorale unique en CND. Différents travaux de recherche ont ensuite été réalisés en collaboration entre des laboratoires de Lyon (GEMPPM, CREATIS, MATEIS, CNDRI, ...) et le LCND, et des enseignements ont été dispensés dans divers stages du CAST, qui ont permis également de proposer des formations originales (ultrasons par immersion, traitement du signal et de l'image de CND).

Ces collaborations ponctuelles ont abouti dernièrement à la création d'une « plateforme de compétences en CND », appelée NDTVALOR, qui regroupe les forces des laboratoires d'Aix-Marseille (LMA), et de Lyon. Gérée par INSAVALOR et PROTISVALOR, elle se veut une réponse aux problèmes de CND en formation, recherche et prestation. La mise en commun des ressources, moyens et compétences répondra à ces objectifs très divers.

Gilles CORNELOUP et Cécile GUEUDRE