DÉTECTION ET LOCALISATION D'ARMATURES PASSIVES OU ACTIVES DANS LE BÉTON

CONTEXTE

Le diagnostic des ouvrages en béton armé ou en béton précontraint nécessite souvent le repérage des armatures internes présentes dans différentes parties de la structure.

Il en est de même pour la réalisation de certains travaux sur les ouvrages, tels le perçage ou le forage du béton pour le scellement d'armatures passives, la mise en place de barres de précontrainte, le passage de réseaux, etc.

La détection et la localisation d'armatures internes au béton peuvent avoir plusieurs objectifs :

- confirmer l'absence ou la présence et la nature d'armatures internes au béton et déterminer si un élément de structure ou un équipement d'ouvrage est en béton non armé, en béton armé ou en béton précontraint ;
- repérer précisément la position des armatures afin d'éviter de les endommager ou de les couper, par exemple lors de la réalisation de perçages ou forages pour prélèvement d'échantillons de béton (poudres, carottes, etc.) dans le cadre d'un diagnostic de l'état du béton armé ;
- réaliser des mesures d'épaisseur d'enrobage ou des mesures électro-chimiques (pour permettre le positionnement de l'électrode de référence en parement pour les mesures de potentiel) dans le cadre d'un diagnostic de corrosion du béton armé ;
- positionner les clichés gammagraphiques à réaliser dans le cadre d'un diagnostic de l'état de la précontrainte (examen de la qualité de l'injection ou de la rupture éventuelle de fils, etc.) ;
- atteindre les armatures sans les endommager en vue de la réalisation de fenêtres :
    - pour examiner l'état des armatures passives ou de précontrainte par pré-tension (corrosion, etc.), déterminer ou confirmer leurs types (aciers doux ou HA, fils ou torons), mesurer leurs diamètres, mesurer la tension résiduelle des armatures de précontrainte par pré-tension (arbalète), etc.,
    - pour examiner l'état des conduits, la qualité de l'injection au coulis de ciment, l'état des armatures de précontrainte par post-tension, déterminer ou confirmer -si possible- les types d'unités et d'armatures de précontrainte, mesurer leurs tensions résiduelles (arbalète), etc.,
- déterminer les caractéristiques principales (position, nombre et/ou espacement, profondeur, estimation du diamètre) d'un ferraillage d'élément en béton armé ou précontraint (poteau, poutre, dalle, etc.), voire d'un câblage de précontrainte intérieure au béton (poutre, âme de caisson, etc.), en l'absence de plan et d'information.

La reconstitution d'un plan de ferraillage ou de câblage de précontrainte intérieure au béton est une opération extrêmement complexe et onéreuse, qui s'avère presque toujours impossible à réaliser de manière complète (sauf éléments de structure simples de type poteaux ou poutres accessibles sur toutes leurs faces) et qui est d'autant plus difficile que l'élément à ausculter est épais, présente des nœuds ou liaisons avec d'autres éléments, comporte des faces inaccessibles, comporte des armatures internes profondes et de faibles diamètres, comprend des armatures internes groupées, incorpore des armatures aux tracés complexes ou avec des recouvrements, etc.

Il est donc fondamental de consacrer beaucoup de temps à la recherche des archives de l'ouvrage à ausculter, préalablement à toute intervention in situ.

Les matériels et les techniques non destructives permettant le repérage des armatures internes du béton sont au nombre de quatre.

Les pachomètres ou profomètres

Matériels basés sur la technique Electro-Magnétique Basses Fréquences E.M.B.F. et la mesure des courants induits, courants de Foucault, dans les armatures. Ils permettent un repérage bi-directionnel manuel, sans représentation graphique ; une évaluation de la profondeur et du diamètre des armatures isolées de la première ou seconde nappe du ferraillage est possible, mais il convient de se méfier des groupements et des recouvrements d'armatures qui perturbent notablement les résultats. Les profondeurs de détection, qui dépendent du diamètre des armatures (les gros diamètres sont détectables plus profondément), sont souvent inférieures à 100 mm pour les diamètres courants des armatures en génie civil mais peuvent aller au-delà de 150 mm pour les appareils les plus sophistiqués.

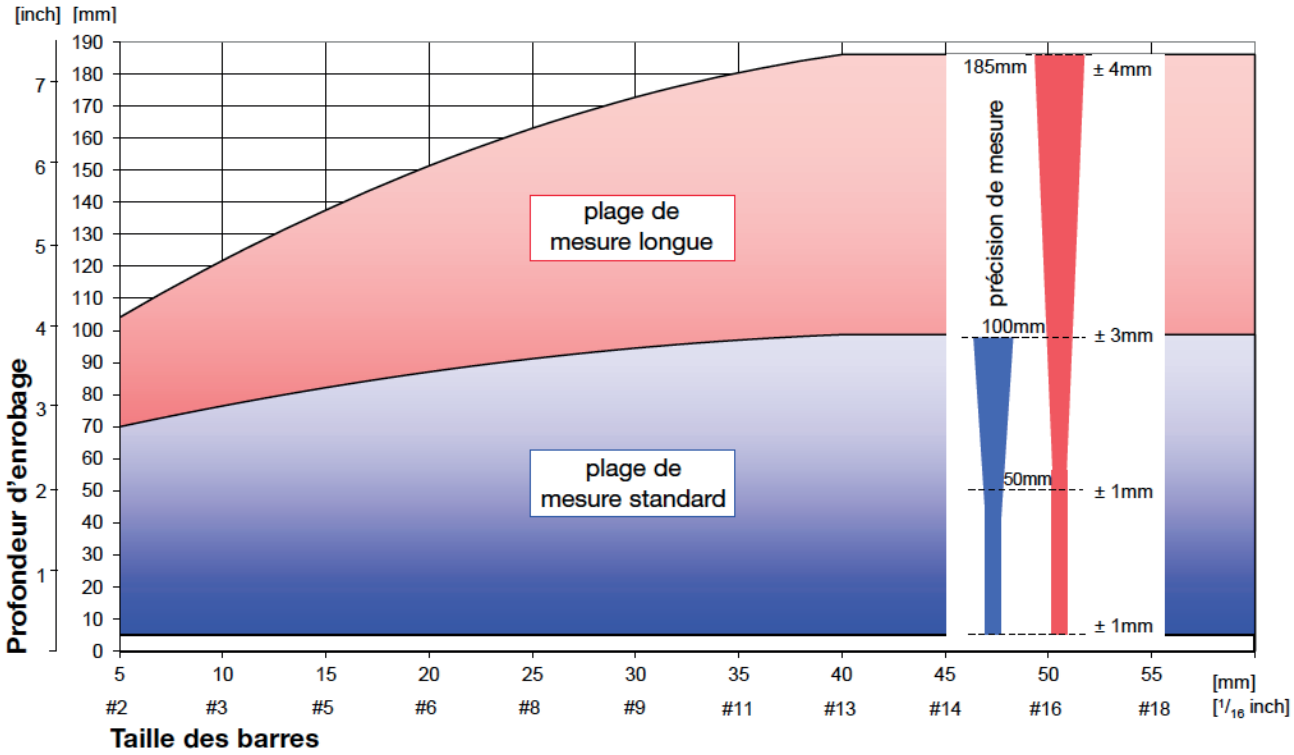


Figure 1 : Exemple de plage de mesure d'un matériel profomètre du marché (Extrait de la documentation technique du Profoscope de Proceq)

Les scanners

Matériels basés sur la technique E.M.B.F. Ils permettent un repérage bi-directionnel des armatures passives de la première ou seconde nappe du ferraillage avec représentation graphique directe en plan X-Y et possibilité de trouver la profondeur Z pour des profondeurs généralement inférieures à 100 mm.

L'estimation du diamètre des armatures passives isolées, à un diamètre normalisé près, est possible avec les types de matériel précédemment évoqués, dans les limites des performances des matériels utilisés. L'estimation de la profondeur ou du diamètre de l'armature isolée est améliorée avec la connaissance respectivement du diamètre ou de la profondeur réelle.

Diamètre d'armature en mm	Profondeur en mm								
	20	40	60	80	100	120	140	160	180
6	±3	±3	±4	±6	±8	0	X	X	X
8	±3	±3	±4	±6	±8	0	0	X	X
10	±3	±3	±4	±6	±8	0	0	X	X
12	±3	±3	±4	±6	±8	±12	0	X	X
14	±3	±3	±4	±6	±8	±12	0	0	X
16	±3	±3	±4	±6	±8	±12	±14	0	X
20	±3	±3	±4	±6	±8	±12	±14	0	X
25	±3	±3	±4	±6	±8	±12	±14	0	X
28	±3	±3	±4	±6	±8	±12	±14	0	X
30	±3	±3	±4	±6	±8	±12	±14	0	X
36	±3	±3	±4	±6	±8	±12	±14	±16	X

La valeur indique la précision typique de la mesure de profondeur (écart à partir de la valeur réelle) en mm.
0 : les fers peuvent être déterminés à cette profondeur mais aucune profondeur n'est calculée
X : les fers ne peuvent pas être déterminés à cette profondeur

Figure 2 : Exemple de précision de détermination d'épaisseur d'enrobage, diamètre d'armature inconnu, pour un matériel scanner du marché (Extrait de la documentation technique HILTI)

Diamètre d'armature en mm	Profondeur en mm								
	20	40	60	80	100	120	140	160	180
6	±2	±3	±3	±4	±5	0	X	X	X
8	±2	±2	±3	±4	±5	0	0	X	X
10	±2	±2	±3	±4	±5	0	0	X	X
12	±2	±2	±3	±4	±5	±10	0	X	X
14	±2	±2	±3	±4	±5	±10	0	0	X
16	±2	±2	±3	±4	±5	±10	±12	0	X
20	±2	±2	±3	±4	±5	±10	±12	0	X
25	±2	±2	±3	±4	±5	±10	±12	0	X
28	±2	±2	±3	±4	±5	±10	±12	0	X
30	±2	±2	±3	±4	±5	±10	±12	0	X
36	±2	±2	±3	±4	±5	±10	±12	±13	X

La valeur indique la précision typique de la mesure de profondeur (écart à partir de la valeur réelle) en mm.
0 : les fers peuvent être déterminés à cette profondeur mais aucune profondeur n'est calculée
X : les fers ne peuvent pas être déterminés à cette profondeur

Figure 3 : Exemple de précision de détermination d'épaisseur d'enrobage, diamètre d'armature connu, pour un matériel scanner du marché (Extrait de la documentation technique HILTI)

Les radars

Matériels basés sur la réflexion d'ondes électromagnétiques à l'interface de matériaux de natures différentes. Ils permettent un repérage bi-directionnel avec représentation graphique directe dans un plan X-Z pour une tranche de Y donné. Ils ne permettent pas de déterminer le diamètre des armatures. Suivant le type et la fréquence centrale d'antenne utilisée, l'état hydrique et le diamètre des armatures internes recherchées dans le béton, la profondeur de détection peut atteindre environ 600 mm, voire 900 mm en cas d'utilisation d'antennes « basses fréquences » et d'absence de lit d'armatures entre le parement et les armatures recherchées.

Lorsque la fréquence centrale de l'antenne diminue, la profondeur d'investigation augmente, mais la résolution verticale (distance minimale pour pouvoir détecter deux « interfaces » parallèles sans signaux radar qui s'entremêlent) augmente également (et vice-versa). Par exemple, des armatures de 12 mm de diamètre pourront être détectées par une antenne de 900 MHz, de fréquence centrale, mais dans le cas d'un lit proche du parement, le signal caractéristique des armatures sera « brouillé » dans l'écho de surface, alors que des antennes « hautes fréquences » assureront une séparation en Z bien meilleure.

L'estimation des profondeurs nécessite de connaître les propriétés électromagnétiques (principalement conductivité électrique et permittivité diélectrique) du matériau béton concerné par l'expertise. Pour ce faire, une calibration de la constante diélectrique (et donc de la vitesse des ondes radar) est nécessaire. Pour cela, il est déconseillé d'utiliser une valeur pré-définie de la vitesse des ondes radar dans le béton pour interpréter les radargrammes. Deux méthodes de calibration sont généralement utilisées :

– Pour un élément de structure d'épaisseur connue, le temps de propagation des ondes radar permet de remonter à une vitesse moyenne. Il est fortement conseillé de trouver un élément dont l'épaisseur peut être mesurée directement. A défaut, il convient d'utiliser les plans fournis par le gestionnaire d'ouvrage. En cas de doute, la calibration sur carottes prélevées dans l'ouvrage permet d'améliorer la précision sur la profondeur.
– La calibration par post-traitements du signal radar permet d'estimer la vitesse moyenne des ondes radar entre le parement et les armatures détectées, à condition que ces armatures puissent être considérées comme des « objets ponctuels » (cas des armatures isolées quand le déplacement de l'antenne radar est perpendiculaire à ces armatures). Il faut noter que les gradients hydriques internes modifient notablement la vitesse des ondes radar, et cette vitesse peut varier entre le béton de peau et le béton plus profond. Il convient donc de se caler sur des « objets ponctuels » situés environ à la même profondeur que les objets recherchés (dans le cas de la détection d'armatures, on se cale généralement sur les objets recherchés, donc en pratique cela ne pose pas de problème).

Dans le cas où la calibration n'est pas possible (interdiction de carotter ou paquets d'armatures), la seule technique offrant le niveau de précision recherché reste la réalisation d'un sondage destructif.

Ces trois premières techniques ne nécessitent l'accès qu'à une seule face de l'élément à ausculter.

Lorsque la densité des armatures est importante ou lorsqu'il y a des recouvrements d'armatures ou encore des ancrages par courbure à leurs extrémités, elles ne sont pas fiables, voire totalement inopérantes.

Ces auscultations par méthodes non destructives peuvent utilement s'accompagner de quelques sondages destructifs ponctuels, lorsque possibles, pour validation et/ou étalonnage (impératif pour l'estimation des diamètres des armatures passives).

La gammagraphie

Matériel utilisant un émetteur de rayonnement gamma, adapté à l'épaisseur de la pièce à ausculter et un film photosensible. Le rayonnement gamma est absorbé en fonction de la nature et de la densité du matériau permettant d'obtenir une image en niveaux de gris, correspondant à la projection ; elle réalise la projection sur un plan X-Y (récepteur) des objets présents dans le volume radiographié.

La gammagraphie dans le génie civil est couramment utilisée pour examiner les armatures actives profondes et déterminer la qualité du remplissage des conduits de précontrainte intérieure par le coulis de ciment.

Pour obtenir la profondeur Z de l'armature et son diamètre, sans information sur le sujet dans le dossier de l'ouvrage ausculté, il est nécessaire de réaliser deux expositions en décalant l'émetteur (gammagraphie double exposition). En revanche, si on connaît l'orientation de l'objet recherché dans le béton, une seule exposition est suffisante pour :

– déterminer sa profondeur Z, si on connaît avec précision son diamètre ;
– ou déterminer son diamètre, si on connaît avec précision sa profondeur.

Cette technique, dont le principal inconvénient est la difficulté de mise en œuvre du fait des contraintes de radioprotection, ne permet que rarement de discriminer les armatures quand elles sont nombreuses et que leur projection est groupée. Par contre, elle permet d'avoir une image précise des armatures internes et donc de savoir si les armatures de béton armé sont lisses ou crantées (HA) ou si les armatures de précontrainte sont constituées de fils, de torons ou de barres.

Elle permet également d'ausculter des sections d'épaisseur faiblement variable (par exemple goussets faiblement inclinés). En effet, avec le recours à l'exploitation d'images numériques obtenues en lieu et place d'images argentiques, malgré la légère perte de netteté des clichés numériques, l'analyse des films est facilitée par l'outil informatique car il permet de faire varier les contrastes de niveaux de gris et de les mémoriser, compensant ainsi les variations d'exposition éventuelles.

Cette technique nécessite l'accès aux deux faces de l'élément à ausculter.

Quelques éléments de comparaison des quatre techniques précédemment évoquées sont précisés dans le tableau suivant.

Matériel / technique	**Profondeur de détection maximale (mm)**	**Résolution verticale associée (mm) (*)**	**Précision sur la profondeur**	**Précision sur le diamètre (armature isolée)**	**Précision sur la position (mm)**
Pachomètres ou profomètres	Suivant le diamètre des armatures et le type de matériel utilisé ; couramment 70 à 90, voire jusqu'à plus de 150	Sans objet	Quelques mm (< ± 10 %)	± 1 diamètre normalisé (pour une profondeur limitée à quelques cm) Diamètre minimal détectable de 6 mm	± 5
Scanners	Suivant le diamètre des armatures et le type de matériel utilisé ; couramment < 100				
Radar avec antenne 2,6 GHz	300-350	30-40	Quelques mm à quelques cm selon la profondeur et la précision du calibrage de la vitesse des ondes radar dans le matériau (+/- 10% avec calibrage)	Sans objet	± 10
Radar avec antenne 1,5 GHz	500-600	50-60			
Radar avec antenne 900 MHz	900	80-90			Ne permet pas une localisation précise in situ des armatures détectées (**)
Gammagraphie Iridium 192	300	SO	± 10 pour la gammagraphie double exposition. Quelques mm pour la gammagraphie simple exposition (connaissance du diamètre et de l'orientation de l'objet recherché)	± 1 diamètre normalisé pour la gammagraphie double exposition Quelques mm pour la gammagraphie simple exposition (connaissance de la profondeur et de l'orientation de l'objet recherché)	Quelques mm pour la gammagraphie simple exposition
Gammagraphie Cobalt 60	600	SO			

(*) les résolutions verticales associées aux différentes antennes radar sont les distances minimales pour pouvoir détecter deux « interfaces » parallèles sans signaux radar qui s'entremêlent.
(**) Le recours à une antenne « basse fréquence » de 900 MHz nécessite un post-traitement pour identifier des armatures, estimer leur profondeur et leur espacement.

Pour valider ou compléter ces techniques non destructives vis-à-vis du repérage et de la caractérisation des armatures internes au béton, il peut être nécessaire, localement, de recourir à des investigations destructives (à fin d'examens visuels ou endoscopiques, de mesure de diamètre). Pour y parvenir, on procède généralement à l'ouverture de « fenêtres » au moyen d'outils manuels pneumatiques ou électriques légers (burinage) ou par hydrodémolition, voire à la réalisation de perçages ou carottages.

L'ouverture de « fenêtres » peut porter atteinte à l'intégrité fonctionnelle de l'élément. Ceci impose donc une certaine « modération » dans le choix et le nombre de fenêtres à ouvrir. En particulier pour les ouvrages précontraints, cette méthode va entraîner, de fait :

- *la réduction irrémédiable de la section de béton comprimé ;*
- *des risques quant à l'intégrité des câbles si les fenêtres ne sont pas correctement rebouchées.*

La pertinence de la méthode est donc à évaluer au regard du fonctionnement de la section au droit des câbles. Par exemple, la réalisation de fenêtres sur des poutres de sections modestes peut s'avérer dommageable pour la résistance de la structure. En cas de doute, il est recommandé de faire une justification des sections après enlèvement de la section de béton comprimée.

Dans tous les cas, ces investigations destructives doivent préserver au maximum l'intégrité des armatures rencontrées. Leur exécution doit être soignée et contrôlée.

En fonction du problème posé (objectifs des auscultations), il faut prendre en compte :

– le niveau d'exigence demandé : caractère ponctuel, local ou étendu de la détection nécessaire, précision sur la valeur des informations recherchées, délai d'obtention des résultats, contraintes de réalisation imposées (exploitation, etc.) ;
– les performances des techniques (profondeur maximale de détection, précision, rendement, etc.), limites d'utilisation (accessibilité 1 ou 2 faces, parements avec relief important, densité de ferraillage, etc.) et contraintes propres aux méthodes utilisables : disponibilité des accès nécessaires, sécurité d'emploi vis-à-vis de l'environnement de l'ouvrage à ausculter, délai d'obtention des résultats, etc. ;
– le coût économique de la démarche : coûts financiers directs et indirects, coût des contraintes d'exploitation induites par la mise en œuvre des auscultations, etc. ;
– les conséquences sur la structure liées à l'emploi éventuel de sondages destructifs associés aux méthodes de détection.

Le choix de la (des) méthode(s) d'auscultation relève d'un compromis technico-économique avec prise en compte des contraintes inhérentes à la (aux) méthode(s) envisagée(s) et des enjeux de l'auscultation. La technique la plus précise ou donnant le plus d'informations ne sera pas forcément celle retenue *in fine*.

La technique par tomographie ultrasonique encore en cours de développement n'est pas abordée dans cette procédure, mais elle devrait permettre de repérer les interfaces et objets (aciers passif et actif, tube, etc.), notamment dans un domaine de profondeur plus important que celui du radar.

MÉTHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC

ÉTAPE 1 ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE	La consultation des archives doit permettre, principalement par l'examen des plans (coffrage, ferraillage, câblage de précontrainte), voire des notes de calculs, de recueillir le maximum d'informations sur la nature et la position (dans les trois dimensions) des armatures passives ou actives des différents éléments de la structure à ausculter. Suivant les objectifs des auscultations, les informations à recueillir sont de nature et de quantité différentes. Il convient de se méfier des informations recueillies sur des documents non explicitement « conformes à l'exécution ». L'examen de photographies voire de témoignages relatifs à la construction de l'ouvrage, peut parfois fournir des informations très utiles. Les stratégies d'auscultation non destructive, éventuellement complétées ou partiellement remplacées par des sondages destructifs, seront ensuite mises en œuvre pour essayer de confirmer les informations disponibles et de recueillir les informations manquantes recherchées en fonction des objectifs des auscultations.
ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE DE L'OUVRAGE	Il s'agit de relever visuellement, au contact du parement, toutes les indications sur la nature et la position des armatures : – armatures apparentes, conduits de précontrainte apparents ; – trace probable des armatures se dessinant à travers le parement de béton (« fantôme » de ferraillage) ; – fissurations suivant très vraisemblablement le tracé des câbles de précontrainte ; – cachetages d'ancrage de câbles de précontrainte visibles, etc. Ces informations seront reportées sur des plans de l'inspection (cartographie des désordres). On pourra profiter de l'inspection détaillée pour examiner les possibilités d'accès pour les futures auscultations.
ÉTAPE 3 AUSCULTATIONS	Il n'existe pas de méthodologie d'auscultation standard et celle-ci est déclinée selon les sept objectifs pouvant être poursuivis. **Objectif 1 : déterminer si un élément de structure ou équipement d'ouvrage est en béton non armé, en béton armé ou en béton précontraint)** Il s'agit de confirmer l'absence ou la présence et la nature d'armatures internes au béton. Doivent donc être privilégiés : – la capacité de détection : profondeur d'investigation associée à la résolution de la détection ; – le rendement de la technique. Le radar apparaît donc comme la méthode la plus adaptée. On peut avoir recours à l'utilisation de plusieurs antennes (2,6 et 1,5 GHz, 900 MHz) selon la profondeur d'auscultation espérée. Des antennes de fréquences plus basses peuvent également être utilisées en cas d'armatures très profondes. Les profils radar à réaliser sont normalement perpendiculaires à la direction attendue des armatures principales. Un espacement raisonnable des différents profils radar parallèles à exécuter doit être défini.

ÉTAPE 3
AUSCULTATIONS

Dans des cas complexes, la réalisation d'une campagne radar pour obtenir une image cartographique « 3D » permet de visualiser les directions générales des aciers (par exemple : en intrados de dalle de biais, détection du ferraillage pour vérifier si celui-ci est posé selon le biais de l'ouvrage ou non).

Des profils radar complémentaires peuvent, bien entendu, être réalisés dans d'autres directions.

Il est possible de discriminer des armatures de précontrainte par rapport à des armatures passives essentiellement en fonction de leurs profondeurs (armatures de précontrainte normalement plus profondes).

En fonction de la profondeur de l'objet détecté, il est possible de réaliser un sondage destructif de confirmation, localisé et de faibles dimensions en plan.

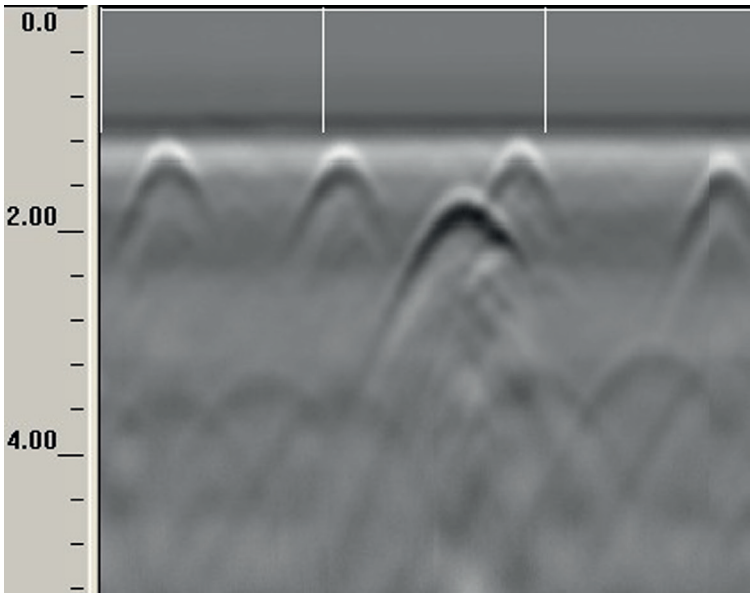


Figure 4 : Câble de précontrainte détecté par radar sous une nappe d'armatures passives (en x déplacement de l'antenne (cm) et en y temps d'écoute (ns)) (Cerema)

Objectif 2 : repérer précisément les armatures internes au béton afin de les éviter dans des travaux ultérieurs

Il s'agit de confirmer l'absence d'armature interne au béton à des emplacements précis (par exemple : perçages ou forages).

Doivent donc être privilégiées :

– la capacité de détection : profondeur d'investigation associée à la résolution de la détection ;
– la précision sur la position ;
– la disponibilité immédiate des résultats.

La gammagraphie, malgré son faible rendement, reste la méthode la plus fiable pour positionner et visualiser un espace libre au cœur du ferraillage dans un élément de structure d'assez forte épaisseur, dont les deux faces sont accessibles.

Le radar, pouvant être associé à plusieurs antennes suivant l'épaisseur de l'élément, présente d'autres avantages (rendement, mise en œuvre sur une seule face de l'élément), mais est limité par son incapacité à déterminer le diamètre des armatures détectées (problème dans le cas où il y a un risque d'intercepter par carottage des objets internes).

Pour des éléments de faible épaisseur (moins de 10 cm, voire moins d'une vingtaine de cm si l'élément est facilement accessible par ses deux faces), il est néanmoins possible d'utiliser un matériel de type scanner, voire pachomètre ou profomètre.

Il est également possible de combiner scanner, voire pachomètre ou profomètre (repérage des premières nappes de ferraillage) et radar (vérification de l'absence d'objet interne profond dans la maille de ferraillage sélectionnée pour le perçage ou le forage).

La position des armatures détectées est tracée sur le parement de béton.

Il est possible de réaliser un pré-trou, de faible dimensions, centré sur le perçage ou forage à exécuter, pour s'assurer de l'absence d'objet interne.



Figure 5 : Zone avant (gauche) et après (droite) les prélèvements de béton. Le câble de précontrainte est tracé en rouge et les aciers passifs en noir (Cerema)

Objectif 3 : déterminer les caractéristiques principales (position, nombre et/ou espacement, profondeur, estimation du diamètre) d'un ferraillage d'élément en béton armé ou précontraint, voire d'un câblage de précontrainte intérieure au béton, en l'absence de plan et d'information.

La détection précise en quantités et dimensions d'armatures internes au béton est un objectif extrêmement ambitieux. En effet, il est illusoire d'espérer reconstituer la totalité de ces informations en l'absence de dossier d'ouvrage, sauf pour des éléments de structure relativement simples. Aussi, les techniques de détection sont surtout appliquées pour confirmer les éléments du dossier d'ouvrage et éventuellement le compléter sur certains points douteux ou absents.

Pour obtenir le maximum d'informations, il est nécessaire de combiner différentes méthodes de détection.

Des zones de mesures doivent être prédéfinies par type d'élément de structure, en fonction des objectifs des recalculs envisagés et des informations obtenues dans le dossier d'ouvrage ou lors de l'inspection détaillée de l'ouvrage.

Cas d'une poutre isostatique en béton armé :

– Détection des armatures d'effort tranchant (cadres, étriers, épingles), verticales voire inclinées, dans l'âme de la poutre dans les premiers mètres au voisinage d'un appui, il sera nécessaire de les localiser, de déterminer leur nombre, diamètres et espacements ;
– Détection des armatures de flexion (longitudinales inférieures) dans le talon de la poutre dans la zone de mi-portée, il sera nécessaire de les localiser, de déterminer leur nombre, diamètres et profondeurs *a minima* pour le lit inférieur (elles peuvent en effet être disposées sur plusieurs lits).

Cas d'une poutre continue en béton armé :

– Outre la recherche des armatures d'effort tranchant et de flexion en travée comme dans le cas précédent, il sera nécessaire de détecter les armatures de flexion (longitudinales supérieures présentes dans la poutre ou dans le hourdis sus-jacent) dans les zones d'appui intermédiaire (nombre, diamètres et profondeurs a minima pour le lit supérieur).

Doivent être privilégiés pour le choix des techniques / matériels :

– la capacité de détection : profondeur d'investigation associée à la résolution de la détection ;
– les précisions sur la position, la profondeur et le diamètre ;
– la disponibilité immédiate des résultats ;
– le rendement suivant le cas.

Pour la détection des armatures passives ou actives recherchées (position, nombre ou espacement, profondeur), on utilisera le plus souvent conjointement :

– le radar associé à des antennes de 2,6, 1,5 GHz voire 900 MHz pour des armatures plus profondes (< 900-1 000 mm). Les profils radar sont réalisés perpendiculairement à la nappe d'armatures étudiée (figures 6 et 7) ;
– un matériel de type scanner pour des armatures peu profondes (< 90 mm), qui permet d'établir des cartographies locales de plusieurs décimètres de côté (figure 8).

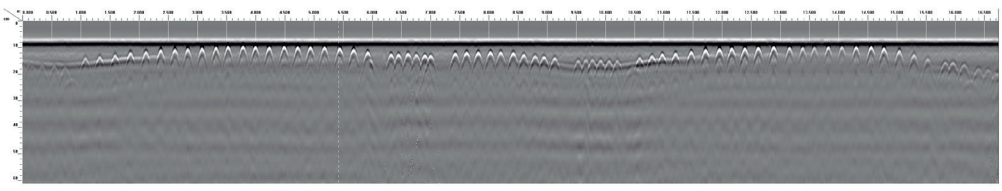


Figure 6 : Profil radar horizontal sur un mur de front de culée. Les armatures sont aisément détectables. L'enrobage varie de façon conséquente (Cerema)

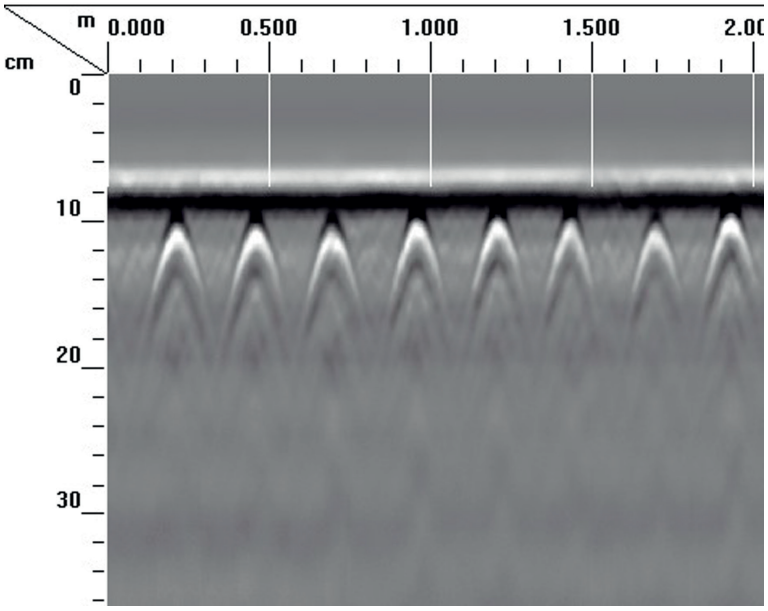


Figure 7 : Profil radar vertical sur la face latérale d'un mur de front de culée. Les aciers horizontaux sont facilement identifiables avec un pas de 25 cm (Cerema)

À noter que le radar peut permettre, dans de bonnes conditions, une détection des armatures supérieures d'un tablier de pont, à partir de la chaussée, en traversant les couches de chaussée, et d'étanchéité, sauf si cette dernière comporte une feuille métallique comme dans le cas du système B3A.

Le radar ne permet cependant pas toujours de repérer des armatures profondes, par exemple lorsqu'il existe un ferraillage proche de la surface ayant une maille très serrée ou lorsque deux armatures profondes sont situées l'une devant l'autre.

ÉTAPE 3
AUSCULTATIONS

Il peut ainsi être nécessaire d'envisager des clichés gammagraphiques à travers les faces latérales accessibles d'un élément d'épaisseur inférieure à environ 60 cm, si nécessaire « en diagonale ». Ils permettent de déterminer le nombre de lits d'armatures principales (cas du ferraillage de flexion d'une poutre à mi-portée par exemple). Il est toutefois pratiquement impossible de déterminer précisément le nombre d'armatures des lits supérieurs.

Le recours à des clichés gammagraphiques permettra également de déterminer le type d'armature (lisse ou HA, fil ou toron) et leurs diamètres (gammagraphie double exposition).

Il peut également se justifier en cas de ferraillage dense (groupement d'armatures, recouvrements), cependant le résultat n'est pas toujours garanti.

La position des armatures détectées est tracée sur le parement de béton

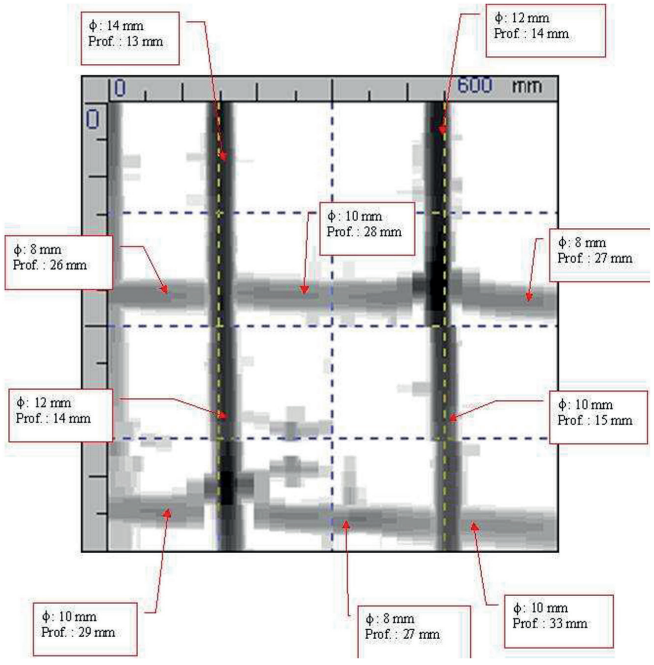


Figure 8 : Exemple de cartographie obtenue avec un scanner - Zone de 60 cm x 60 cm (Cerema)

ÉTAPE 3
AUSCULTATIONS

En l'absence de possibilité de recours à des clichés gammagraphiques (accès simple face, contraintes fortes de radioprotection ou économiques, etc.), pour la détermination des types et diamètres des armatures passives, de profondeur « accessible », il est toujours nécessaire de réaliser des sondages destructifs pour venir compléter les informations issues des mesures non destructives. Ceux-ci permettront de confirmer les estimations de diamètres des barres isolées du scanner.

La technique radar est la plus appropriée pour détecter des câbles de précontrainte par post-tension :

– en réalisant des profils de mesure verticaux, sur l'âme des poutres de type VIPP dans les premiers mètres à partir des appuis, ainsi que sur les parements de leurs entretoises ;
– en réalisant des profils longitudinaux en sous-face de hourdis intermédiaire (recherche d'une précontrainte transversale) ;
– en réalisant des profils transversaux en sous-face de talon de poutre de type VIPP ou en intrados de dalle précontrainte à mi-portée ;
– en réalisant des profils transversaux en extrados de dalle précontrainte continue au droit des appuis intermédiaires, etc.

Cette technique ne permet malheureusement pas d'obtenir d'information sur les dimensions et la nature des câbles (torons parallèles ou toronnés ou fils parallèles) et des conduits (feuillard mince ou épais ou tube rigide ou guipage). Seule la gammagraphie permet de déterminer la nature des câbles et conduits, sans pouvoir préciser le nombre exact de fils ou de torons (une approche grossière peut seulement être envisagée).

En outre, la technique radar peut donner des informations complémentaires quant au remplissage du conduit par le coulis de ciment et repérer d'éventuelles armatures détendues voire rompues (observables dans certains cas).

Objectif 4 : Positionner des clichés gammagraphiques pour examiner la qualité de l'injection au coulis de ciment d'armatures de précontrainte par post-tension

Pour pouvoir être ausculté par gammagraphie, l'élément de structure doit être accessible par ses deux faces et avoir une épaisseur maximale d'environ 60 cm

L'implantation des expositions à réaliser est adaptée au type d'élément de structure à ausculter, à son fonctionnement et est discutée au regard des conditions d'accès et de radioprotection. Elle fixe un nombre de clichés adapté pour couvrir statistiquement les différentes familles de câble mises en œuvre dans la structure ; elle précise leurs positions, généralement plutôt en parties hautes des conduits, à proximité des ancrages. De cette implantation découle le choix du matériel de gammagraphie à mettre en œuvre, en fonction des épaisseurs de béton et des conditions de radioprotection.

Doivent être privilégiés :

– la capacité de détection : profondeur d'investigation associée à la résolution de la détection ;
– la précision sur la position ;
– la disponibilité immédiate des résultats ;
– le rendement suivant le cas.

En fonction de la profondeur des câbles de précontrainte, on utilisera pour positionner les clichés de gammagraphie :

– les informations du dossier d'ouvrage si celles-ci existent et sont fiables ;
– un matériel de type scanner, voire pachomètre ou profomètre, pour des câbles peu profonds (< 90 mm) (par exemple : âme de poutre d'épaisseur maximale d'une vingtaine de cm) ;
– le radar associé à une antenne de fréquence centrale d'au moins 1,5 GHz pour des câbles plus profonds (< 500-600 mm).

La position des armatures détectées est tracée sur le parement béton.

Objectif 5 : réaliser des fenêtres pour examiner l'état des conduits, la qualité de l'injection au coulis de ciment, l'état d'armatures de précontrainte par post-tension, déterminer ou confirmer -si possible- les types d'unités et d'armatures de précontrainte, mesurer leurs tensions résiduelles (arbalète), etc.

Les câbles concernés ne doivent pas être trop profonds, compte-tenu des difficultés de réalisation d'une fenêtre pour les atteindre. On sélectionne donc des zones « favorables » par exemple âme de poutre de VIPP dans les premiers mètres à proximité des appuis (ce sont normalement des zones ayant déjà fait l'objet de clichés gammagraphiques), sous-face de talon de poutre de VIPP ou intrados de dalle à mi-portée, extrados de dalle continue au droit des appuis intermédiaires, etc.

Doivent être privilégiés :

– la capacité de détection : profondeur d'investigation associée à la résolution de la détection ;
– les précisions sur la profondeur et la position ;
– la disponibilité immédiate des résultats ;
– le rendement suivant le cas.

La taille de la fenêtre est à dimensionner « au minimum » suivant l'examen pratiqué et dépend du type d'armature ou de câble testé. À titre indicatif, la taille standard d'une fenêtre est de l'ordre de 30 cm x 80 cm pour permettre les mesures de tension à « l'arbalète » (la mini-arbalète permet de réduire l'ouverture à une cinquantaine de centimètres de longueur).

Le positionnement préalable des fenêtres est crucial afin de limiter l'endommagement de la section. Ce positionnement peut mettre en œuvre différents matériels évoqués dans la présente fiche. En fonction de la profondeur des câbles de précontrainte, on utilisera :

– un matériel de type scanner voire pachomètre ou profomètre, pour des câbles peu profonds (< 90 mm) ;
– le radar associé à une antenne de fréquence centrale de 2 à 3 GHz pour des câbles plus profonds (< 300-350 mm).

Les deux types de matériel peuvent bien entendu être utilisés conjointement (figures 9 et 10).

La position des armatures détectées est alors tracée sur le parement de béton.



Figure 9 : Réalisation d'une fenêtre au droit d'un câble longitudinal en talon de poutre (Cerema)



Figure 10 : Réalisation d'une fenêtre au droit d'un câble de précontrainte d'une entretoise intermédiaire (Cerema)

ÉTAPE 3
AUSCULTATIONS

Objectif 6 : réaliser des fenêtres pour examiner l'état (corrosion) d'armatures passives ou de précontrainte par pré-tension, déterminer ou confirmer leurs types, mesurer leurs diamètres, mesurer la tension résiduelle des armatures de précontrainte par pré-tension (arbalète)

Les armatures passives à détecter sont normalement situées à une faible profondeur, généralement inférieure à 100 mm (armatures de la première voire de la seconde nappe).

Doivent donc être privilégiés :

– les précisions sur la profondeur et la position ;
– la disponibilité immédiate des résultats ;
– le rendement suivant le cas.

L'utilisation de matériel de type scanner voire pachomètre ou profomètre est bien adaptée. Il est également possible d'utiliser le radar associé à une antenne de fréquence centrale de 2 à 3 GHz.

La position des armatures détectées est tracée sur le parement béton.

Objectif 7 : réaliser des mesures d'épaisseur d'enrobage ou des mesures électro-chimiques

Les armatures passives à détecter sont normalement situées à une faible profondeur, généralement inférieure à 100 mm (armatures de la première voire de la seconde nappe).

Doivent donc être privilégiés :

– les précisions sur la profondeur (pour les mesures d'enrobage) et la position ;
– la disponibilité immédiate des résultats ;
– le rendement suivant le cas.

ÉTAPE 3
AUSCULTATIONS

L'utilisation de matériel de type scanner, voire pachomètre ou profomètre, est bien adaptée. Il est également possible d'utiliser le radar associé à une antenne de fréquence centrale de 2 à 3 GHz.

La position des armatures détectées est tracée sur le parement de béton (figure 11).

Pour la réalisation de mesures de potentiels électro-chimiques, il est nécessaire de dégager localement une armature dans chaque zone de mesure pour connecter le circuit électrique.

La distribution des enrobages est généralement représentée sous forme d'histogramme et de courbe des enrobages cumulés (voir exemple en figure 12). Certains logiciels associés à certains matériels de type scanner ou radar facilitent ces représentations.

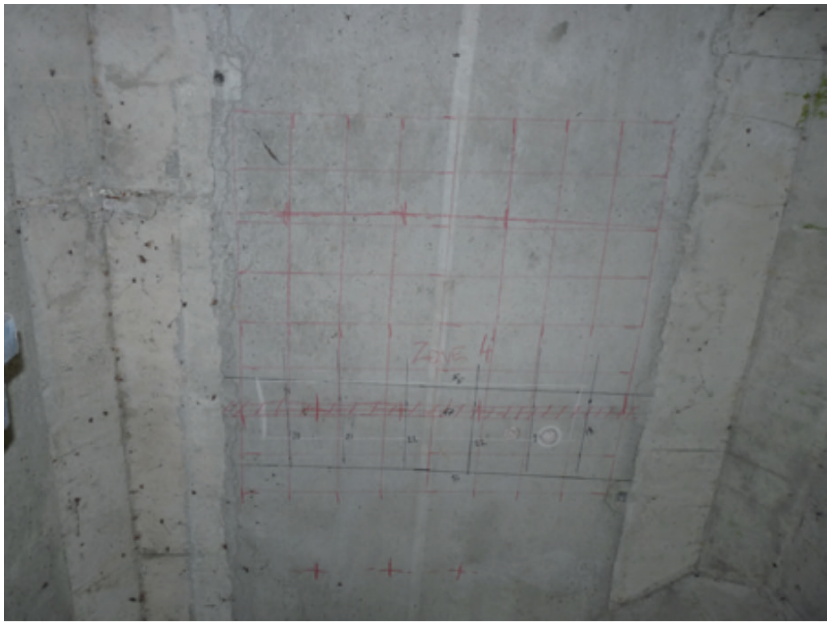


Figure 11 : Zone en intrados de hourdis avec marquage du ferraillage et du câblage par scanner (Cerema)

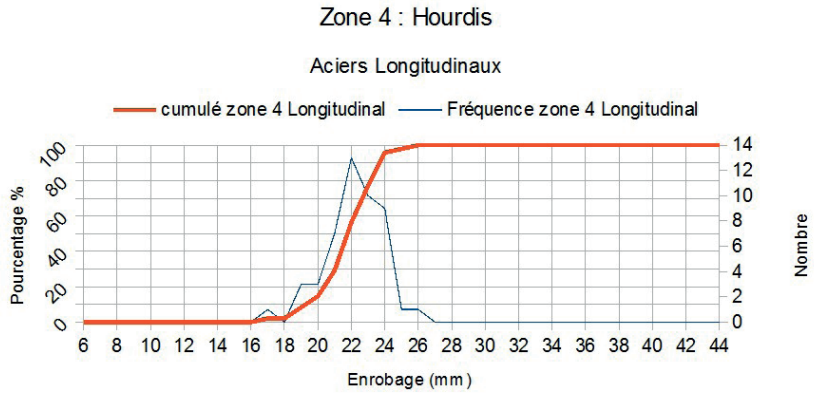


Figure 12 : Distribution des mesures d'enrobage pour les aciers longitudinaux d'une zone de hourdis (Cerema)

RÉFÉRENTIEL

LCPC - Guide méthodologique de surveillance et d'auscultation des VIPP. Octobre 2001.

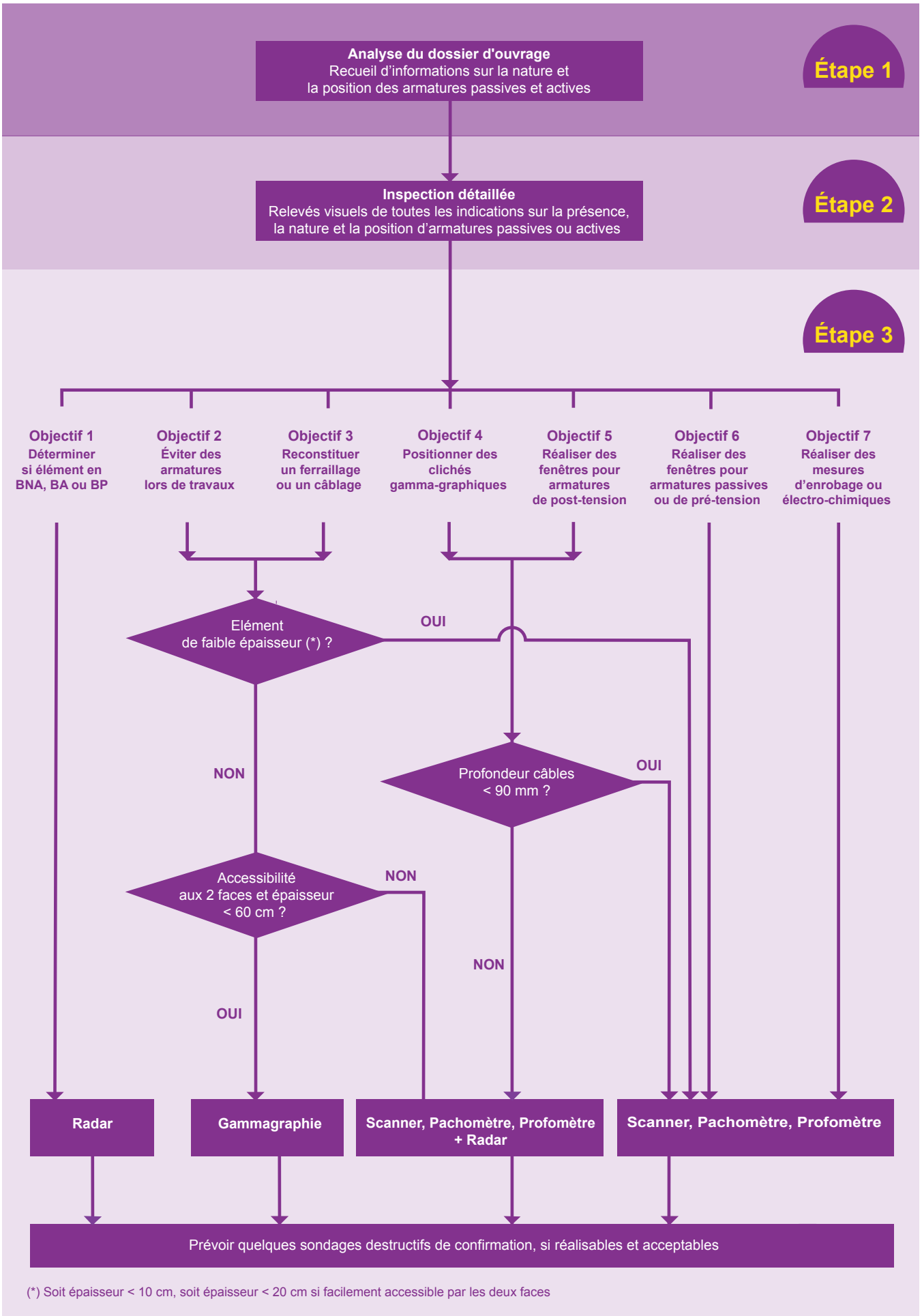
Recueil de méthodes d'auscultation des matériaux et structures d'ouvrages d'art :

- B2-1 Mesure de la profondeur d'enrobage et du diamètre des aciers
- B5-1 Gammagraphie, radiographie et radioscopie
- C1-1 Technique radar pour localisation d'armatures

LOGIGRAMME

Un logigramme ou un schéma décisionnel, visualisant de façon séquentielle et logique les actions à mener et les décisions à prendre pour aboutir au diagnostic résume la méthodologie de diagnostic.

E2-1 : DÉTECTION ET LOCALISATION D'ARMATURES PASSIVES OU ACTIVES DANS LE BÉTON



(*) Soit épaisseur < 10 cm, soit épaisseur < 20 cm si facilement accessible par les deux faces