

Chapitre 1

Introduction

1.1 Capteurs et applications

Ces dernières années, beaucoup d'attention a été portée au développement d'équipements miniaturisés, destinés à l'acquisition et à la communication de données diffuses. Cette avancée a engendré une diffusion massive des capteurs et des équipements associés dans beaucoup de domaines d'application. Un capteur a pour rôle de collecter des données se rapportant à un phénomène physique observable. Un capteur est souvent intégré dans un système plus large, lui permettant d'effectuer du traitement sur les données, et éventuellement coopérer avec d'autres capteurs via un dispositif de communication. Un capteur sans fil fonctionne avec un dispositif de communication sans fil. Plusieurs capteurs sans fil déployés sur une zone donnée pour surveiller un phénomène physique spécifique forment une infrastructure de réseau de capteurs sans fil (RCSF).

Depuis leur apparition, les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) ont ouvert de nouvelles thématiques et de nouveaux défis dans la recherche, afin de mieux résoudre des problèmes issus de divers domaines (environnemental, industriel, militaire, médical). Ces réseaux peuvent être déployés dans divers environnements : maison, commerce, entrepôt, ville, ou encore dans des environnements hostiles comme un terrain militaire, un site volcanique ou sismique, etc. Ils s'intègrent également dans les systèmes modernes de contrôle industriel tels que l'automatisation des chaînes de montage, la recherche de la qualité, etc. Ils permettent de collecter et de traiter des informations complexes, se rapprochant à différents types de phénomènes.

Dépendant des propriétés de la zone de déploiement, il est courant d'entrevoir les éléments d'un RCSF tel qu'un système combinant observation et calcul distribué, confinés à une dimension spatiale finie. Ce qui fait entrer en jeu l'autonomie des capteurs qui est une des spécificités des RCSFs. Une fois déployés, les capteurs doivent être capables de fonctionner de manière autonome. Ce qui expose les capteurs à beaucoup de contraintes, plus particulièrement au regard des faibles capacités les caractérisant. Une gestion efficace de l'énergie aide à allonger la durée de vie d'un réseau de capteurs. Cette gestion est souvent contrainte par le fonctionnement à faible puissance

des capteurs, qui le plus souvent fonctionnent sous batteries une fois déployés. En outre, une fois les données collectées, celles-ci doivent être acheminées à un point du réseau en vue de futurs traitements et de mise à disposition vers des utilisateurs.

1.2 Historique des réseaux de capteurs

L'idée de réseau de capteurs aurait émergé du concept d'acquisition distribuée de données, introduit dans les années 80's par la DARPA¹. Le premier système présentant toutes les caractéristiques d'un réseau de capteurs, en termes de distribution, et de traitement de données hiérarchiques, est le système de surveillance (SOSUS)[19], constitué de capteurs acoustiques (hydrophones) installés au fond de l'océan, pour détecter et suivre les sous-marins.

Le projet DSN [22] porté en 1980 par la DARPA, dont l'objectif principal était l'exploration de nouveaux systèmes de communication entre machines, a incontestablement initié les bases des réseaux de capteurs modernes. Les exigences en termes de design d'applications des RCSFs modernes étaient présentes, à savoir : les capteurs devaient être peu coûteux, avec un fonctionnement autonome et une échange de données de manière indépendante. Un réseau de capteurs acoustiques de suivi d'avions à basse altitude est conçu à la suite de collaboration entre l'Université Carnegie Mellon (CMU), Pittsburgh, PA, et la MIT². Un ordinateur central jouait le rôle de collecteur, et un système sans fil faisait transiter les données depuis les capteurs et les rendant disponibles sur une plate-forme de suivi. Selon l'ITU [73], ces travaux étaient bien en avance sur ce temps et ont donné une impulsion considérable au développement des réseaux de capteurs.

Le projet WINS, lancé en 1993, a porté l'initiative de passer à l'échelle, en considérant pour des besoins pratiques, un nombre considérable de noeuds capteurs. Les capteurs sont conçus comme des systèmes sans fil intégrés, à faible puissance, basés sur des éléments de détection micro-électromécaniques. WINS est allé plus loin sur la conception de protocoles réseau dédié à un système de couverture sans fil (émetteur-récepteur), sujet à une transmission de données à vitesse relativement faible(1 à 100 kbps)[69, 68]. En terme de développement matériel, la plateforme physique de WINS était équipée d'un convertisseur analogique-numérique, d'un analyseur de spectre, d'une mémoire cache, et était destinée aux mesures en continu. Des restrictions sur la consommation d'énergie sont aussi prises en compte, et chaque nœud capteur était alimenté par une simple batterie Li-Ion de 2,5 cm de diamètre. Une gestion efficace de l'énergie aurait été atteinte en agissant sur la vitesse de traitement du signal, en réduisant la portée de couverture des nœuds capteurs, en optimisant le débit des données et les délais de demandes de réponses sur le canal radio. L'impact de WINS a comme répercussion le débouché sur des applications diversifiées, notamment dans le domaine civile.

Un autre projet LWIM de l'Université de Californie à Los Angeles (UCLA), financé par la DARPA[11] visait à créer des modules de réseau de capteurs sans fil à faible puissance. L'objectif

1. Agence des Projets de Défense Avancée

2. Massachusetts Institute of Technology

était d'élaborer des dispositifs de mesure sans fil, compacts, pouvant être déployés partout. Un module comprenant des capteurs de vibrations et infrarouge, avec un émetteur-récepteur de faible puissance permettant une portée de 30 m, avec une vitesse de transmission des données d'environ 1 kbps[5] a été conçu.

De nouvelles opportunités ont également vues le jour avec SenseIT et PicoRadio. Deux expériences ont été menées en 2000 et 2001. dont le but était de vérifier les capacités de traitement de signaux collaboratifs dans les installations d'essai au sol du Marine Corps, en Californie. Des nœuds de capteurs prenant en charge la détection, l'identification et le suivi de cibles ont été produits, avec une fonction de connectivité.

Le programme PicoRadio[70] lancé en 1999 visait comme objectif de réaliser l'assemblage d'un réseau de stockage à faible consommation d'énergie, et capable de faire fonctionner les nœuds grâce à l'énergie solaire. PicoRadio aurait permis le développement de plate-forme pour diverses applications en raison des nombreuses possibilités offertes par le protocole logiciel de base[73].

Un autre projet a poussé plus loin la conception de capteurs miniaturisés, "smart dust", qui pourraient tomber de l'air comme la poussière, pourrait se déplacer avec des masses d'air et coopérer pendant quelques heures ou jours. Ce prototype était basé sur l'intégration d'un capteur, d'une diode laser et d'un miroir MEMS unique et compact pour la réception et la transmission à rayonnement optique[50]. D'autres moyens de transmission de données tels que le rayonnement lumineux ont été développés et testés. En termes de résultats, un mini-boîtier cubique a été proposé, composé de micro-capteurs (température, humidité, pression barométrique, intensité lumineuse, inclinaison, vibration, champ magnétique), avec une radio bidirectionnelle offrant une portée de communication de 20 mètres, un microprocesseur et une batterie d'une durée de vie d'une semaine en fonctionnement continu, et de 2 ans en fonctionnement cyclique[67].

En 1999, la MIT a porté le projet AMPS (Capteurs multi-domaines et micro-adaptatifs), comprenant toute une gamme de défis dans la conception et la mise en œuvre des réseaux [73] tels que la basse puissance de consommation des composants matériels et logiciels, l'utilisation de micro-contrôleurs auto-adaptifs, capables de fonctionner sous différents niveaux de tension, afin de réduire les besoins en puissance au niveau logiciel[12]. Le point commun avec le projet WINS porte sur l'efficacité énergétique, à la fois au niveau des nœuds capteurs individuels que de l'ensemble du réseau. Une spécificité réside sur l'autonomie du système, permettant entre autres la configuration automatique, la reconfigurabilité et la flexibilité.

Le protocole LEACH[46], qui est un protocole de communication dédié aux réseaux de capteurs, est une conséquence directe du projet AMPS. LEACH opère par une distribution aléatoire des fonctions du coordinateur du réseau. Le nœud coordinateur étant le principal consommateur d'énergie dans un RCSF à grande échelle, car collectant toutes les données du réseau, cette distribution confère un rôle aux différents nœuds et aligne la consommation d'énergie du réseau. Cela permet une décharge moins rapide de la batterie, comparé aux autres protocoles.

En termes de standardisation, au début des années 2000, l'IEEE a publié la première version de la norme IEEE 802.15.4 «Réseaux locaux personnels sans fil à faible débit». Celui-ci a été

développé spécialement pour les équipements à faible consommation[45]. Cette norme régit la conception de bas niveau de capteur, de protocoles de communication, représentant la couche physique et l'accès au support de communication.

De nombreuses normes utilisant l'IEEE 802.15.4 ont vu le jour, parmi lesquelles : ZigBee³, WirelessHART⁴ et 6LoWPAN⁵. Depuis quelques années, ZigBee est la norme la plus largement utilisée pour les RCSFs. ZigBee est une suite de protocoles de communication de haut niveau, construite sur la norme 802.15.4, utilisée pour créer des réseaux personnels, et développée par la « ZigBee Alliance »⁶.

De nos jours, l'avènement de nouveaux schémas de modulation ont permis d'initier les bases de la communication longue portée dans les RCSFs, corrélée à la traditionnelle exigence de faible puissance de consommation, et à la réduction de coûts dans la conception. LoRa est une technique de modulation à base d'étalement de spectre, capable de fonctionner sur plusieurs plages de fréquences, et répondant aux exigences d'applications dans des zones semi-urbains et rurales, dont la couverture au regard d'autres réseaux (par exemple le GSM) n'est pas toujours évidente. Cependant, les problématiques initiales sont toujours présentes, même si des efforts considérables ont été apportées ces dernières années. Quelques travaux basés sur cette nouvelle technologie de communication ont récemment été conduits dans [33] et [26]. Dans ces cas de figures, les capteurs sont déployés sur des bêtes, ou sur des champs agricoles, afin de collecter des données et de les transmettre à un point de collecte dédié. Les données sont retrouvées sur une plate-forme ouverte⁷, permettant d'effectuer différents traitements du point de vue d'un utilisateur.

La diffusion de plus en plus croissante des capteurs dans les objets pose énormément de défis. Garantir une qualité des données se rapportant aux phénomènes physiques observés est de plus en plus une tâche lourde, étant donné la diversité des circonstances possibles dans le monde réel des objets. La qualité de service pourrait être assurée par l'étude des aspects de la couverture, et d'identifier les éléments découlant de l'interaction entre capteur avec environnement physique.

1.3 La couverture dans les RCSFs

La couverture se réfère à la manière dont un phénomène est observé par les capteurs déployés dans une région donnée. La capacité de contrôle d'un capteur par rapport à un phénomène localisé est étroitement liée à sa zone de couverture et de communication. Généralement tout point localisé dans la zone de couverture d'un capteur est dit couvert par ce capteur. Également, deux capteurs peuvent communiquer s'ils se retrouvent dans une même zone de communication. La zone de couverture est généralement vue comme un disque, dont le capteur est placé au centre,

3. <http://www.zigbee.org/About/AboutAlliance/TheAlliance.aspx>. Dernier accès : 20 Oct.2018.

4. <https://fieldcommgroup.org/>. Dernier accès : 20 Oct.2018.

5. <https://datatracker.ietf.org/wg/6lowpan/charter/>. Dernier accès : 20 Oct.2018.

6. groupe de sociétés qui gèrent et publient le logiciel ZigBee la norme

7. www.waziup.eu

et dont le rayon définit la portée de couverture du capteur. La zone de contrôle d'un capteur est donc représentée par ses zones de couverture et de communication.

Beaucoup d'études se sont accordées sur une catégorisation des problèmes de couverture en trois types [16] : la couverture de surface, la couverture de cibles et la couverture de barrière. La couverture de barrière consiste à construire une barrière de réseau de capteurs, permettant de détecter l'intrusion d'un élément mobile à travers cette barrière. On parle de couverture de surface lorsqu'il s'agit de surveiller une zone entière. La couverture de surface garantit que tout point dans la zone d'intérêt soit couvert par au moins un capteur du réseau. Enfin la couverture de cibles garantit la couverture d'un ensemble fini de points discrets dans une zone d'intérêt.

La couverture de cibles trouve son écho dans divers domaines (militaire, médical). L'objet d'étude peut être de nature diverse : discrète (cibles militaires, patient, points spatiaux cibles) ou continue (environnementales, climatiques, etc.). Le dit objet peut être observé ou suivi par des capteurs environnants, embarqués ou attachés à la cible.

Pour certaines applications, des capteurs peuvent être déployés de manière déterministe, c'est-à-dire placés à des endroits précis dans la zone d'intérêt, à proximité de points cibles, pour surveiller et reporter des données vers une station de base. Dans ce cas, le problème posé par la couverture est celui de l'optimisation du placement des capteurs dans la zone d'intérêt, de façon à satisfaire certains objectifs tels que minimiser le nombre ou le coût des capteurs à déployer. Cependant lorsque la position exacte des cibles n'est pas connue à l'avance, ou que le milieu est incompatible à l'accès physique, disperser aléatoirement les capteurs en surnombre⁸ dans la zone d'intérêt constitue l'alternative au déploiement déterministe. Avec un tel scénario, les objectifs de couverture peuvent ne pas être atteints du au type de déploiement.

Un déploiement aléatoire peut engendrer une disproportion dans les sous-zones couvertes par chaque capteur. Certains capteurs se retrouvent couvrant plus de cibles que d'autres, de même qu'une proportion plus ou moins importante de cibles sont susceptibles d'être couvertes par plus de capteurs que d'autres. Une organisation de l'activité des capteurs s'avère nécessaire, afin d'atteindre une bonne qualité de service en terme de couverture, tout en maintenant une gestion efficace de l'énergie afin de maximiser la durée de vie du réseau. La gestion de la couverture des cibles dans les RCSFs, qui constitue l'essence de ce travail, tente de répondre à cette problématique, en proposant des techniques basées sur l'ordonnancement de l'activité des capteurs, afin de mieux contrôler la couverture [36, 85, 54].

1.4 Objectifs et contributions

Les modèles de couverture capturent les aspects de la relation capteur et environnement physique. Ces aspects à leurs tours caractérisent le déploiement dans une zone donnée. Un premier objectif dans ce travail de recherche consiste à passer en revue les modèles de couverture usuels

8. Les capteurs peuvent être déployés en un nombre largement supérieur à l'optimum nécessaire pour satisfaire les objectifs de couverture initialement.

dans la littérature. Dans cette logique, les différents problèmes de couverture, ayant été adressés dans la littérature, ainsi que les techniques proposées sont développés dans les premiers chapitres. Les problèmes peuvent être vus de manières diverses, tenant compte du type de déploiement, des modèles de couverture et de communication, des contraintes plus ou moins génériques telles que la gestion de l'énergie, ainsi que d'autres paramètres.

Nous tentons également de formuler quelques problèmes spécifiques à la couverture de cibles dans les RCSFs. Différentes formulations de ces problèmes sont proposées. La gestion de l'activité des capteurs dans une topologie, combinée à l'efficacité énergétique est un des éléments de ces formulations. La recherche de solutions optimales ou quasi-optimales, conjuguée à la contrainte pesante de maintenir une gestion efficace de l'énergie, conduit à entrevoir la plupart de ces formulations comme des problèmes d'optimisation. L'adoption de techniques mathématiques, combinée à l'approche algorithmique constitue une base solide de représentation et de raisonnement afin d'aboutir à des propositions exactes ou approximatives.

Ce travail est en grande partie motivé par l'observation des modèles de couverture, et leurs impacts sur les protocoles de couverture. Un modèle de couverture définit la relation entre un capteur et son voisinage dans une topologie. La relation est souvent représentée selon une perspective géométrique. Le capteur dispose d'un espace physique, délimité par un disque abstrait de rayon r , avec une valeur de couverture entière ou nulle. La majorité des travaux de la littérature est basée sur des modèles idéalistes, et centrée autour de la proposition de protocoles non confrontés à des cadres réalistes d'observation. L'applicabilité de ces solutions à des configurations réelles, est rendue complexe par divers aspects : la prise en compte de contraintes telles que l'efficacité énergétique, le maintien de la connectivité dans des contextes de déploiement aléatoire, ou encore la réduction de coût et l'optimisation du placement des nœuds capteurs dans un déploiement déterministe. Le fait de rapprocher la zone de couverture d'un capteur à un modèle circulaire de manière générale constitue le fondement de beaucoup de travaux, et le choix des contraintes du problème est un élément de complexité additionnel à considérer dans les lignes directrices de ces travaux.

En considérant les revues récentes, il est usuel de constater la diversité des approches et techniques algorithmiques proposées pour résoudre des problèmes spécifiques. Cependant, une certaine constance est également visible sur la rareté de spécifications avancées, dans la relation topologique entre capteur et environnement physique. La profondeur des techniques algorithmiques proposées est souvent mise en évidence au détriment d'aspects relatifs à la modélisation topologique. Le choix d'une topologie de simulation est important pour la validation des protocoles proposés. Face à ce choix, l'étude de modèles de terrain, et le fait de les rapprocher à des systèmes compatibles, tels que les systèmes cellulaires [90], est un des axes développés dans ce travail.

Les techniques mathématiques offrent une représentation formelle des modèles et protocoles. L'adoption de méthodes géométriques octroie des éléments de raisonnement, et de calcul, lorsque certaines informations telles que, les proportions d'une zone de déploiement et les paramètres

de sensibilité spatiaux des capteurs sont bien définis. Pour chaque type de problème, une représentation graphique ou géométrique est fournie, afin d'appréhender les éléments représentables se rapportant à ce problème. Les algorithmes sont proposés sous formes de pseudo-code, dont l'implémentation est traduite en simulation sur des jeux de données constitués.

1.5 Organisation du document

Ce travail est divisé en huit chapitres. Le chapitre 1 introduit les notions génériques liées au contexte de l'étude, à l'historique des réseaux de capteurs sans fil, à la problématique de la couverture, mais également aux objectifs de ce travail de recherche.

Le chapitre 2 expose les différents types de capteurs ainsi que leurs compositions internes. Les capteurs étant équipés de transducteurs, les aspects liés à quelques propriétés de ces transducteurs telles que le rayonnement, sont étudiés en début de chapitre. Le rayonnement d'un capteur reflète le plus souvent le modèle de couverture qui lui est compatible. Ces modèles sont abordés en fin de chapitre.

Une revue des motivations et objectifs de la couverture, ainsi que l'essentiel des problèmes adressés dans la littérature sont présentés dans le chapitre 3. Une vue globale des problèmes de couverture de cibles y est exposé, avant de parcourir les divers travaux dans la littérature, ayant adressés ces problèmes, ainsi que les différentes approches de solutions.

Les chapitres 4 et 5 abordent la formalisation du problème de la gestion de la couverture de cibles centralisée dans les RCSFs sous différents modèles de couverture (déterministe et probabiliste). Un contexte de déploiement aléatoire est considéré. Des solutions basées sur une approche algorithmique efficace sont investies, des propositions spécifiques sont apportées. Celles-ci sont basées sur les approches d'ordonnancement de l'activité des capteurs, de façon à satisfaire un certain nombre d'objectifs en rapport avec la formulation du problème. Les caractéristiques des protocoles sont vues de près en termes de complexité et de convergence des solutions. Des simulations intenses ont permis de mettre en évidence la proximité des solutions avec l'optimum théorique, ainsi que sa légèreté en complexité de calcul vis-à-vis d'autres protocoles candidats.

S'agissant d'un déploiement déterministe, la planification du placement des capteurs dans la zone de déploiement est une tâche envisageable lorsque des contraintes réalistes telles que la minimisation de coût, et du nombre d'équipements utilisés sont présentes. Dans cette logique, le chapitre 6 est consacré à l'approche de positionnement par styles de découpages en motifs réguliers. Différents schémas de motifs sont étudiés. Les propriétés de chacun des motifs sont mises en évidence par des relations mathématiques.

L'étude des modèles de couverture dans des modèles de terrain numériques [60] est effectuée dans le chapitre 7. Les paramètres des différents modèles sont manipulés, afin d'observer le comportement dans la couverture de l'espace physique. Un système cellulaire est utilisé comme cadre de simulation, avec l'intégration de données topologiques issues de sources de données spatiales. Le comportement de chacun des modèles étudié est observé sur les cellules de la to-

pologie physique constituée. Différentes configurations topologiques sont aussi testées, afin de mieux appréhender le comportement de ces modèles sur des données réelles.

Lorsqu'un capteur est déployé sur un environnement réel, à obstacles, l'absence d'uniformité dans la répartition des éléments topologiques sur l'espace physique amène à considérer de près les interactions entre le capteur et sa zone physique. La zone de couverture d'un capteur est obstruée par la présence d'obstacles. La visibilité d'un point est également conditionnée par le profil de chemin entre un capteur et ce point. Le même cas de figure est noté en présence de communication entre capteurs sans fil. Deux capteurs sans fil équipés de dispositifs fournissant la puissance de signal requise, sont capables de communiquer de manière fiable en présence de visibilité. Le chapitre 8 est consacrée à une tentative d'étude unifiée de ces aspects.

Enfin, le chapitre 9 présente une synthèse de ce travail, avant d'esquiver des perspectives pour des recherches futures.

Chapitre 2

Transducteurs et modèles de capteurs

2.1 Introduction

Ce chapitre introduit les concepts de base des capteurs. En partant des aspects physiques, et des différences fondamentales entre les capteurs et les transducteurs, des généralités sur les types de capteurs sont discutées. Celles-ci sont suivies d’une présentation sur les méthodes mathématiques décrivant la relation entre la donnée produite par un capteur et le signal capturé depuis monde physique.

Les transducteurs sont des éléments de base dans la composition des capteurs. Ils permettent de convertir de l’énergie d’une forme à une autre, afin de rendre exploitable les mesures produites par un capteur. Les transducteurs sont conçus et calibrés en laboratoire, et ensuite incorporés sur des capteurs. Ce qui influe en grande partie sur le mode de fonctionnement du capteur et sa sensibilité par rapport au phénomène cible. Quelques cas de figures sont exposés pour illustrer les aspects essentiels en rapport avec la sensibilité d’un transducteur.

Une fois déployé sur le terrain, la portion d’espace physique où le capteur acquiert des données représente sa zone de couverture. Les modèles de couverture permettent de représenter cette zone, en tentant de capturer la relation spatiale/géométrique liant le capteur à la zone de déploiement. Une vue d’ensemble de ces modèles est présentée, avant de conclure sur l’objectif de ce chapitre.

2.2 Capteurs et transducteurs

Un capteur est un équipement électronique capable de réagir à un stimulus et de répondre par un signal électrique. Un stimulus est un signal d’entrée caractéristique d’un objet ou d’une propriété physique quantifiable. Le signal obtenu après réception d’un stimulus est électrique au sens où il est possible de l’amplifier et de le modifier par un dispositif électronique. Il est appelé signal de sortie et apparaît le plus souvent sous forme de tension, ou d’une grandeur physique [40].

Un capteur est souvent assimilé à un transducteur. La distinction réside sur le fait qu’un capteur génère un signal de sortie en réponse à un stimulus, alors qu’un transducteur convertit

de l'énergie d'une forme à une autre. Un microphone peut être vu comme un capteur en ce sens qu'il capture une certaine quantité d'énergie provenant d'un rayonnement d'ondes acoustiques, et convertit cette énergie en signal électrique. Cependant, un haut-parleur est un transducteur car ayant pour rôle de convertir un signal électrique en ondes acoustiques.

Un capteur peut inclure un ou plusieurs transducteurs. Ces derniers auront pour rôle de convertir successivement une quantité d'énergie initialement capturée depuis l'extérieur, jusqu'à la production d'un signal électrique. Dans ce cas on parle de capteur complexe, opposé au cas du capteur simple qui convertit directement la quantité d'énergie reçue en signal électrique sans obligatoirement passer par un transducteur [65].

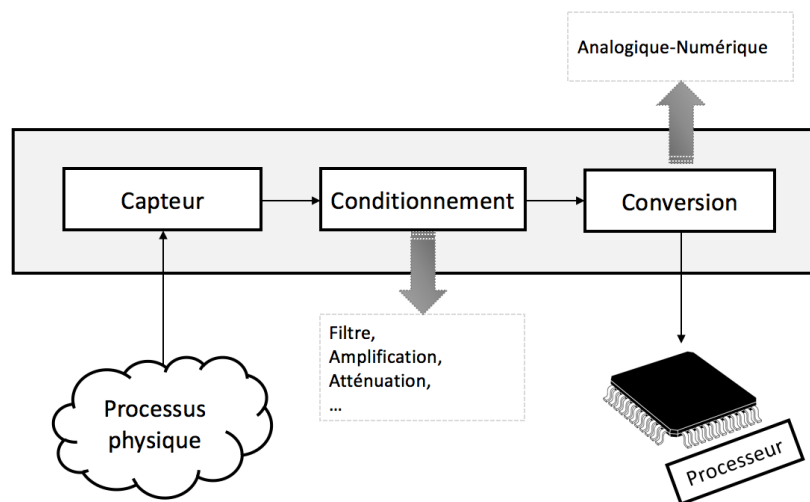


FIGURE 2.1 – Chaîne d'acquisition de données

Un capteur acquiert des données sur un objet physique en relevant les changements d'état observés sur cet objet ou sur le processus physique concerné. L'acquisition de données fait souvent intervenir d'autres éléments dans le traitement du signal perçu de l'extérieur afin de le rendre utilisable. La figure 2.1 en donne une illustration. Des étapes de conditionnement sont nécessaires, où un ensemble de traitements peuvent être appliqués au signal obtenu. Par exemple, le signal peut avoir besoin d'être amplifié ou atténué, afin d'adapter sa magnitude au système électronique dans lequel il sera intégré. Dans d'autres cas, le signal a besoin d'être filtré de façon à éliminer les bruits ou les fréquences inutiles, potentiellement nuisibles à l'interprétation des données [89, 79, 22].

2.3 Classification des capteurs

De façon intuitive, les capteurs peuvent être classifiés en se basant sur la nature des grandeurs physiques qu'ils peuvent détecter : chaleur, pression, température, etc.

Au delà de l'aspect physique, les capteurs sont le plus souvent catégorisés en tenant compte du fait qu'ils aient besoin ou non d'une source additionnelle d'énergie pour produire des données. De ce point de vue, les capteurs sont souvent catégorisés en deux classes : actif et passif. Un

capteur actif émet une sorte d'énergie compatible avec la nature du processus physique extérieur, en guise de réponse, ou pour capturer les variations d'énergie dans le signal émis. Un capteur passif à l'opposé, génère directement un signal proportionnel à la quantité d'énergie capturée de l'extérieur. Par exemple, un thermocouple est un capteur passif et simple, au sens où le courant électrique est produit directement par réaction au stimulus, lequel est une variation de température [40].

Les capteurs peuvent également être classifiés en tenant compte d'autres paramètres tels que la nature des matériaux entrant en jeu dans la conception du capteur (conducteurs, semi-conducteurs, substances chimiques), le mode de conversion des signaux d'entrée (thermoélectrique, photoélectrique, magnétoélectrique, transformation chimique ou physique, transformation biologique, spectroscopie, etc.), et également par rapport au système où ils sont intégrés (applications civiles, médicales, militaire, logistique, etc.) [71, 89, 22].

2.4 Fonctions de transfert

La relation entre le stimulus en entrée et le signal électrique produit en sortie peut être relativement complexe, compte tenu des spécificités du capteur et de la nature du phénomène physique en question. Par exemple, un capteur peut requérir plusieurs étapes de conversion de signaux pour produire un signal électrique exploitable. La relation entre le signal d'entrée et le signal de sortie est généralement représentée par une fonction de transfert exprimée comme dans l'équation 2.1 :

$$S = f(s) \quad (2.1)$$

Avec S le signal de sortie et s le stimulus. Le stimulus en retour peut être estimé par l'inverse de la fonction de transfert, i.e. $f^{-1}(S)$.

En s'appuyant sur la littérature des capteurs, les modèles de transfert sont classifiés en plusieurs catégories comme illustré dans la figure 2.2.

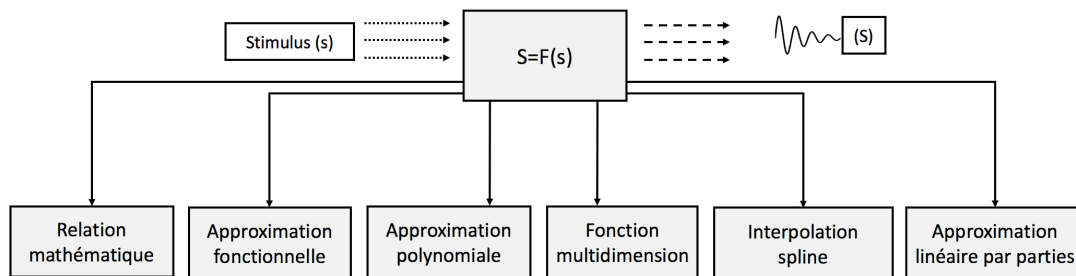


FIGURE 2.2 – Fonctions de transfert usuelles entre stimulus et signal électrique [40].

Ces méthodes vont des relations mathématiques simples, à des approximations de fonctions complexes, en passant par des fonctions linéaires et non linéaires. Les signaux d'entrées pouvant être de divers types, il est possible d'exprimer une fonction de transfert avec un niveau suffisant

de détails, capturant l'ensemble des éléments entrant en jeu.

2.4.1 Relations mathématiques simples

Lorsque la génération de données est régie par un rapport direct entre le signal d'entrée et le signal de sortie, alors la fonction de transfert peut être exprimée par une fonction mathématique simple. La formule 2.2 représente l'inverse de la fonction de transfert, d'un potentiomètre à résistance linéaire, permettant de calculer le stimulus d'entrée.

$$f^{-1}(S) = \frac{S}{E}D \quad (2.2)$$

Avec E représentant la valeur de tension de référence, et D le déplacement maximal. Une autre fonction de transfert affine est donnée dans l'équation 2.3.

$$S = Xs + Y \quad (2.3)$$

Avec X représentant un coefficient, et Y la sensibilité de la fonction. Ces paramètres peuvent être déterminés lors des procédures de calibrage.

Cette relation mathématique représente l'une des formes d'expression les plus simples de fonctions de transfert existantes. En réalité, la relation entre signal d'entrée et signal de sortie est plus complexe à déterminer. Lorsqu'elle n'est pas linéaire, des techniques d'approximation peuvent être utilisées pour exprimer le signal de sortie.

Lorsque la sensibilité représentée par Y dans l'équation 2.3 a tendance à varier avec différents stimulus, alors il est possible d'avoir recours à une fonction montrant différentes mesures de sensibilité pour différentes valeurs de stimulus. Une telle fonction est généralement non linéaire, et peut être représentée par la dérivée de la fonction de transfert, exprimée comme dans l'équation 2.4.

$$f'(s) = \frac{dS(s)}{ds} \approx \frac{\Delta S}{\Delta s} \quad (2.4)$$

Où Δs représente une faible variation du signal d'entrée, et ΔS la variation observée dans la mesure de la fonction de sortie.

2.4.2 Approximation polynomiale

Une approximation polynomiale peut être utilisée lorsque la relation entre le signal d'entrée et de sortie ne peut pas être exprimée par une expression mathématique simple. Dans ce cas, la réponse S du capteur par rapport au signal d'entrée s est définie par un polynôme d'ordre n , comme dans l'équation 2.5.

$$S = a_1s^n + a_2s^{n-1} + a_3s^{n-2} + \dots + a_m \quad (2.5)$$

D'un point de vue mathématique, une fonction de transfert polynomiale avec un plus grand ordre octroie une meilleure précision.

2.4.3 Méthode de la fonction fragmentée

Lorsque la fonction non linéaire exprimée est assez complexe, en termes de discontinuité par exemple, une méthode possible consiste à considérer un ensemble de points critiques sur la fonction de façon à la fractionner en des fragments de sections linéaires. Chaque fragment de la ligne courbée est évalué comme une ligne droite. De cette façon, il devient commode d'évaluer la fonction de transfert globale comme le cumul d'un ensemble de fragments de fonctions pouvant être évaluées comme linéaires. La plage de valeur représentant l'intervalle probable des signaux d'entrée peut être extraite en considérant la section correspondante aux valeurs en abscisse. La figure 2.3 proposée dans [40] illustre cette méthode. Il est possible d'estimer la déviation de la

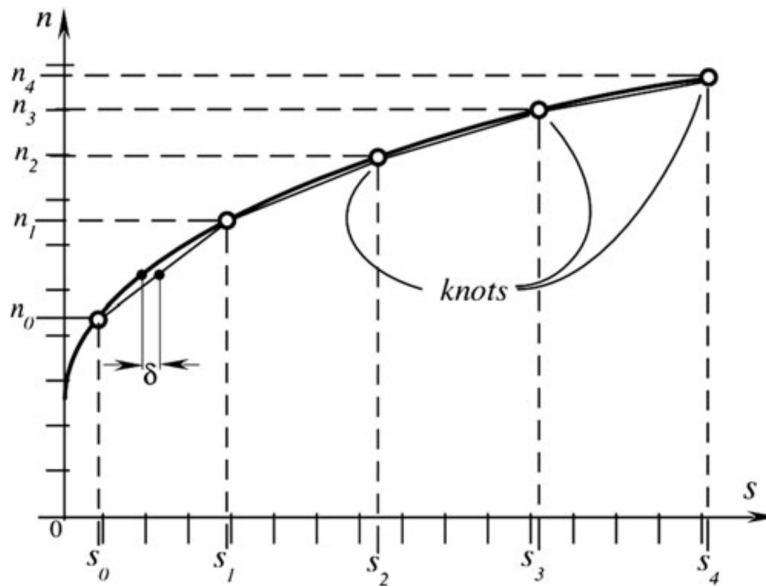


FIGURE 2.3 – Fonctions de transfert non linéaire découpée en plusieurs sections, chacune délimitant un fragment de fonction linéaire.[40]

méthode en définissant une marge d'erreur. Celle-ci pourrait par exemple consister à l'erreur quadratique entre l'approximation obtenue par application de la méthode et l'allure réelle de la fonction, ou simplement l'écart-type dans des cas de figure moins complexes.

2.4.4 Fonctions multidimensionnelles

Lorsque la fonction de transfert prend plusieurs paramètres comme signaux d'entrées, alors la valeur de sortie de la fonction est influencée par l'ensemble de ces paramètres. Lorsque la fonction prend deux valeurs en entrées, son comportement peut être décrit dans un repère à trois axes, comme illustré dans la figure 2.4, avec les deux axes de base représentant les entrées des deux paramètres. L'équation 2.6 illustre un cas spécifique d'un capteur de radiation thermique,

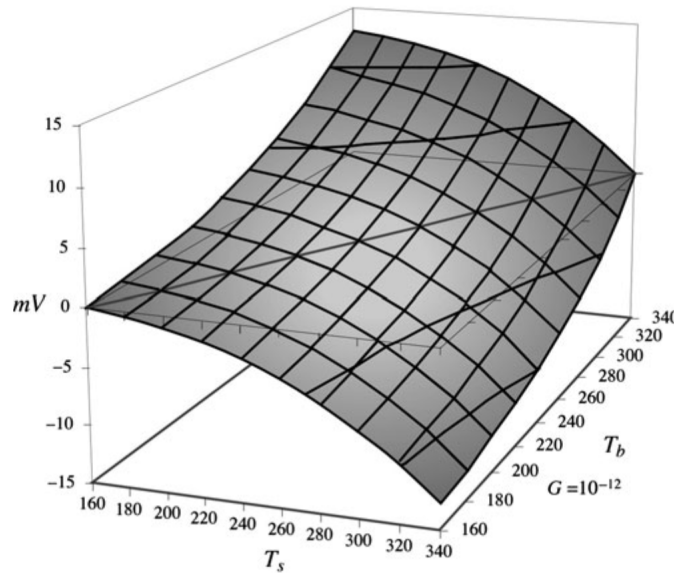


FIGURE 2.4 – Fonctions de transfert multidimensionnelle car prenant deux entrées représentées par les deux axes de bases [40].

dont la tension de sortie (V) est exprimée par une fonction prenant deux arguments : T_b , la température absolue de l'objet, et T_s , la température à la surface du capteur.

$$V = G (T_b - T_s) \quad (2.6)$$

Où G est définie comme une constante. La représentation graphique de la fonction 2.6 est donnée en figure 2.4.

Une fonction multidimensionnelle est caractérisée par le nombre de variables entrant dans la fonction de transfert. Elles sont largement utilisées pour la reconstruction d'images en 3D, à partir de dispositifs sensoriels [55, 43]. Ce qui rend possible l'extraction d'une grande variété de structures sujettes à la visualisation, et à la manipulation directe de détails provenant d'un environnement immersif. Une des contraintes majeures est une augmentation non négligeable de ressources en calcul, au bénéfice d'une meilleure précision en termes de reconstitution de formes volumiques. Également, un défi majeur réside sur l'identification des variables axiales, et le choix des types de variables pouvant être scalaires, ou dérivées d'autres grandeurs [55, 98].

2.5 Capteur et zone de rayonnement : expression angulaire

Le rôle d'un transducteur c'est de convertir une certaine quantité de signal d'une forme à une autre. Deux exemples de transducteurs répandus sont le microphone et le haut-parleur. Un microphone est un transducteur qui convertit des ondes sonores en signaux électriques, tandis qu'un haut-parleur convertit des signaux électriques en ondes sonores. Le diagramme de rayonnement d'un capteur représente la sensibilité relative d'un transducteur exprimée le plus souvent en fonction d'un angle spatial. Ce diagramme est déterminé par des facteurs tels que la fré-

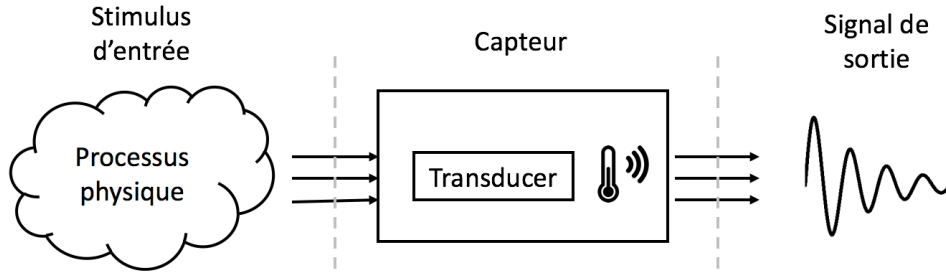


FIGURE 2.5 – Diagramme de fonctionnement d'un transducteur.

quence de fonctionnement, la taille, la forme et les caractéristiques des équipements composant le transducteur.

Les transducteurs sont conçus pour émettre différents types de rayonnement, allant des faisceaux omnidirectionnels aux faisceaux directionnels étroits. Un rayonnement de signal omnidirectionnel émet une même quantité de puissance sur toutes les directions. Ce qui permet d'abstraire la représentation de la zone de couverture d'un capteur à un disque de rayon r et délimitant la portion de zone contrôlée par le capteur.

Un rayonnement directionnel focalise une quantité plus importante de signal sur une direction donnée. Pour un type de rayonnement directionnel, plusieurs cas de figures sont possibles. La figure 2.6 illustre trois cas de rayonnement, dont les deux premiers sont des cas particuliers de rayonnement directionnel : unidirectionnel/bidirectionnel, c'est-à-dire émettant sur une seule/deux directions différentes.

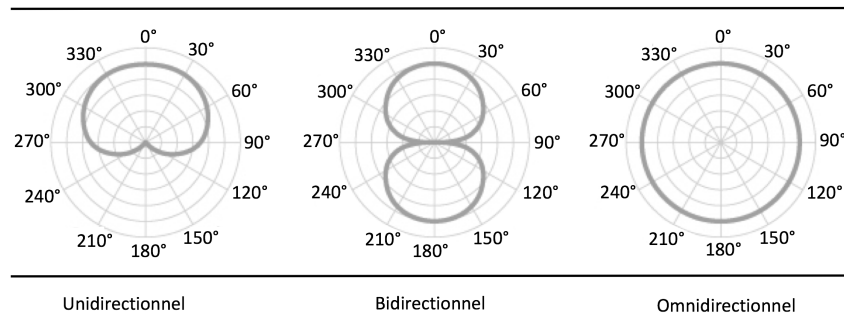


FIGURE 2.6 – Faisceau de rayonnement omnidirectionnelle et directionnelles.

La directivité caractérise la capacité d'un transducteur à fonctionner dans une direction donnée. Cette directivité peut être exprimée par un indice, calculé à travers l'équation 2.7.

$$D_x = 10 \log \left(\frac{I_D}{I_O} \right) \quad (2.7)$$

Avec I_D désignant l'intensité du signal mesurée à la position angulaire où le lobe principal est émis, et I_O l'intensité omnidirectionnelle.

Dès lors qu'un rayonnement omnidirectionnel émet la même quantité de puissance sur toutes les directions d'un plan, il peut être admis que plus l'intensité du signal dirigé vers un angle

donné est importante, mieux se comporte l'indice de directivité.

Le diagramme de rayonnement d'un transducteur est habituellement exprimé et graphiquement représenté en montrant la réduction relative de la sensibilité en fonction de l'angle spatial, avec une sensibilité maximale le long de l'axe de l'émetteur, étant égale à 0 dB sur l'illustration présentée en figure 2.7. L'angle de rayonnement du transducteur est égal à l'arc englobé par le faisceau entre les angles lorsque la pression tombe à un niveau de $-X$ dB de chaque côté de l'axe principal.

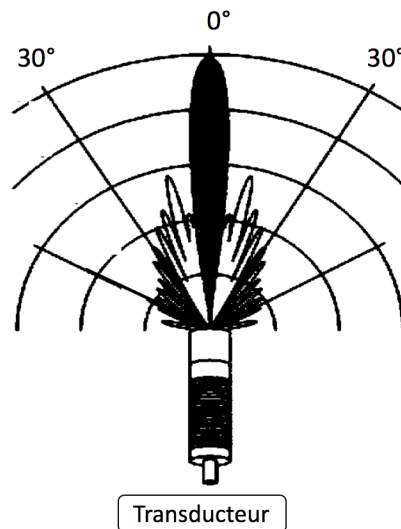


FIGURE 2.7 – Faisceaux de rayonnement d'un transducteur avec une radiation angulaire maximale à 0°.

2.5.1 Expressions angulaires et rayonnement de transducteur

L'expression angulaire est souvent utilisée pour représenter la zone de rayonnement d'un transducteur. Elle est caractérisée par l'angle spatial du faisceau de radiation émise depuis la source.

Cas du rayonnement ultrasonique

Un transducteur ultrasonique est souvent conçu pour des besoins de directivité. La fonction principale d'un capteur ultrasonique est d'émettre des ondes ultrasoniques dont le faisceau est dirigé de manière appropriée sur un médium ou un objet donné. Les ondes émises, une fois réceptionnées, sont reconverties en signal électrique et la distance de la position du transducteur vers l'objet cible peut être déterminée.

Le rayonnement d'un transducteur ultrasonique est le plus souvent constitué d'un lobe principal avec une grande valeur d'indice de directivité, et de lobes latéraux de taille et de portée relativement petites. Afin de mesurer de manière précise la distance par rapport à un

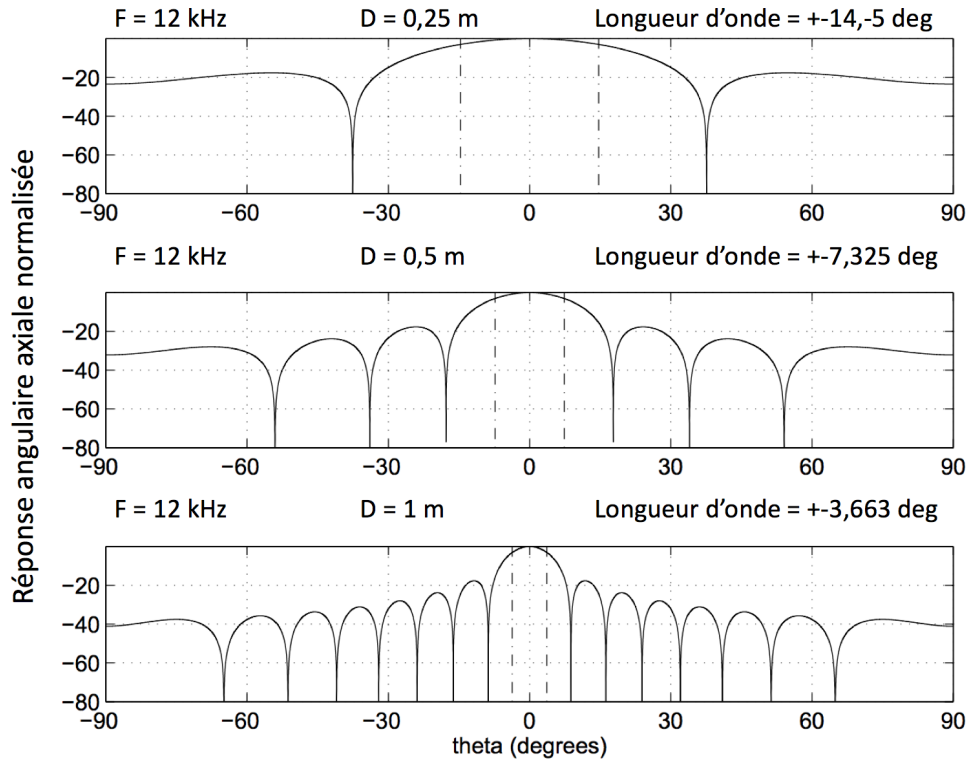


FIGURE 2.8 – Mesures angulaires de faisceau de rayonnement d’un transducteur circulaire sous différentes valeurs de D/λ .

objet donné, le faisceau principal émis doit être le plus étroit possible, tout en minimisant les faisceaux latéraux. Ce qui permet de réduire les interférences, et la probabilité d’être obstrué par la présence d’autres objets situés latéralement, et par conséquent, de se focaliser sur l’objet vers lequel le faisceau droit principal est dirigé.

Le faisceau principal devient plus arrondi lorsque le diamètre du transducteur est augmenté. En fixant la fréquence d’émission du transducteur, et en faisant varier le rapport D/λ , avec D le diamètre du transducteur et λ la longueur de l’onde, les lobes latéraux ont tendance à se rétrécir et à se multiplier, alors que le lobe principal devient plus arrondi. La figure 2.8 illustre cet aspect en observant les lobes émis à une fréquence de 12 KHz, avec des valeurs du rapport D/λ égales à 2, 4 et 8, pour un transducteur ultrasonique.

Expression angulaire d’un rayonnement ultrasonique

Les transducteurs peuvent être conçus sous des formes et des tailles différentes. Une des formes les plus répandues sont les transducteurs linéaires et circulaires. Ces spécificités influencent le rayonnement ainsi que la capacité du transducteur.

Étant donné un transducteur linéaire de longueur L le long d’un axe cartésien z , émettant de manière uniforme des radiations avec une intensité A/L , l’objectif c’est de calculer l’intensité du signal acoustique au point (r, θ) situé à une distance r par rapport au centre du transducteur.

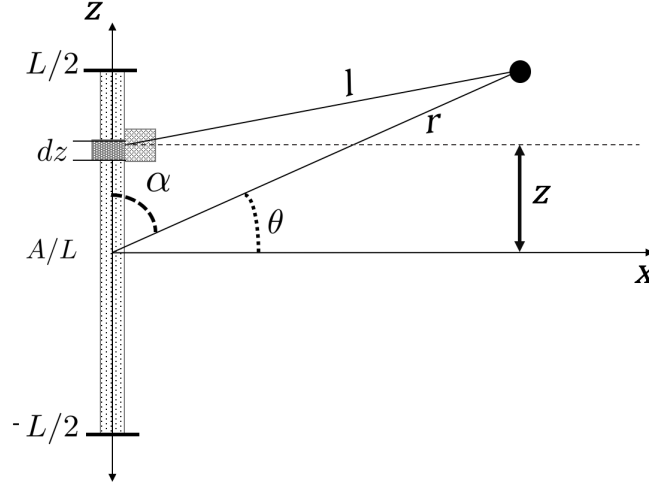


FIGURE 2.9 – Représentation géométrique du problème de calcul de l'intensité acoustique au point (r, θ) .

En considérant la géométrie du problème dans la figure 2.9, l pourrait être exprimé en fonction de r et θ . En appliquant la loi des cosinus, on a cette égalité de départ :

$$l^2 = r^2 + z^2 - 2rz \cos \alpha \quad (2.8)$$

En factorisant par r^2 , et en remplaçant $\cos \alpha$ par $\sin \theta$, 2.8 devient :

$$l^2 = r^2 \left(1 - \frac{2z}{r} \sin \theta + \frac{z^2}{r^2} \right) \quad (2.9)$$

En prenant la racine carrée de l , 2.9 devient :

$$l = \sqrt{r^2 \left(1 - \frac{2z}{r} \sin \theta + \frac{z^2}{r^2} \right)} = r \left(1 - \frac{2z}{r} \sin \theta + \frac{z^2}{r^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

A ce niveau la racine carrée peut être simplifiée et nous pouvons utiliser la propriété selon laquelle :

$$(1 + x)^p = 1 + px + \frac{p(p-1)}{2!} + \frac{p(p-1)(p-2)}{3!} + \dots \quad (2.11)$$

En retenant que le premier terme avec $p = \frac{1}{2}$,

$$(1 + x)^{\frac{1}{2}} \cong 1 + \frac{1}{2}x \quad (2.12)$$

l'équation 2.10 devient :

$$l \cong r \left(1 + \frac{1}{2} \left(-\frac{2z}{r} \sin \theta + \frac{z^2}{r^2} \right) \right) \quad (2.13)$$

$$l \cong r \left(1 + \left(-\frac{z}{r} \sin \theta + \frac{z^2}{2r^2} \right) \right) \quad (2.14)$$

$$l \cong r - z \sin \theta + \frac{z^2}{2r} \quad (2.15)$$

En considérant que $z \ll r$, le terme $\frac{z^2}{2r}$ peut être négligé. Ce qui permet d'obtenir :

$$l \cong r - z \sin \theta \quad (2.16)$$

Pour un élément de taille dz à la position z , l'amplitude du signal à l'emplacement (r, θ) est définie par :

$$dp = \frac{A}{L} \frac{1}{l} e^{-i(kl - wt)} dz \quad (2.17)$$

L'intensité cumulée du signal à l'emplacement (r, θ) , due à la forme linéaire du transducteur peut être exprimée par intégration [74] :

$$p = \frac{A}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{1}{l} e^{-i(kl - wt)} dz \quad (2.18)$$

En remplaçant l par son expression dans l'équation 2.18, celle-ci devient :

$$p = \frac{A}{L} e^{-i(kr - wt)} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{1}{r - z \sin \theta} e^{ikz \sin \theta} dz \quad (2.19)$$

En considérant un rapport entre r et $z \sin \theta$, l'expression 2.19 pourrait être davantage simplifiée par :

$$\frac{1}{r - z \sin \theta} \approx \frac{1}{r} \quad (2.20)$$

En simplifiant l'expression 2.19, celle-ci devient :

$$p = \frac{A}{rL} e^{-i(kr - wt)} \int_{-L/2}^{L/2} e^{ikz \sin \theta} dz \quad (2.21)$$

L'intégrale peut être évaluée à :

$$p = \frac{A}{rL} e^{-i(kr - wt)} \left[\frac{e^{ikz \sin \theta}}{ik \sin \theta} \right]_{-L/2}^{L/2} \quad (2.22)$$

$$p = \frac{A}{rL} e^{-i(kr-wt)} \left[\frac{e^{\frac{1}{2}ikL \sin \theta} - e^{-\frac{1}{2}ikL \sin \theta}}{ik \sin \theta} \right] \quad (2.23)$$

Ensuite le terme $1/L$ est intégré dans l'expression entre crochets :

$$p = \frac{A}{r} e^{-i(kr-wt)} \left[\frac{e^{\frac{1}{2}ikL \sin \theta} - e^{-\frac{1}{2}ikL \sin \theta}}{ikL \sin \theta} \right] \quad (2.24)$$

En utilisant la propriété selon laquelle :

$$\sin(x) = \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i} \quad (2.25)$$

Alors l'équation 2.24 peut être écrit comme suit :

$$p = \frac{A}{r} e^{-i(kr-wt)} \left[\frac{\sin\left(\frac{1}{2}kL \sin \theta\right)}{\frac{1}{2}kL \sin \theta} \right] \quad (2.26)$$

L'expression 2.26 représente l'intensité angulaire du signal à l'emplacement (r, θ) en considérant un transducteur linéaire de longueur L . L'expression entre crochets élevé au carré définit le diagramme de rayonnement angulaire du transducteur linéaire :

$$b(\theta) = \left[\frac{\sin\left(\frac{1}{2}kL \sin \theta\right)}{\frac{1}{2}kL \sin \theta} \right]^2 \quad (2.27)$$

Expression angulaire d'un transducteur acoustique

En tentant d'appréhender la forme de rayonnement émise depuis une source donnée, la réponse angulaire d'un transducteur acoustique élémentaire peut souvent être exprimée par :

$$p = p_0 \frac{\sin(\pi\omega/\lambda \sin \theta)}{\pi\omega/\lambda \sin \theta} \quad (2.28)$$

Où p désigne l'intensité du signal acoustique, ω désigne la taille de l'élément transducteur, et λ représente la longueur d'onde du signal émis dans le médium de propagation.

D'un autre point de vue [74], cette équation est une interpolation inadéquate de la théorie de diffraction scalaire. Ceci est dû au fait qu'il est habituellement considéré que l'élément transducteur est entouré d'une baffle rigide. En considérant que la pression exercée par l'élément transducteur $p_0(x)$ est uniforme et égale à 0 en dehors du transducteur, l'équation de diffraction de Rayleigh-Sommerfeld en trois dimensions peut être utilisée :

$$p(r, \theta) = \frac{1}{j\lambda} \int p_0(x, y) \frac{e^{2j\pi R/\lambda}}{R} \cos \theta' dx dy \quad (2.29)$$

Où R représente la distance entre le point source $(x, 0)$ et le point d'observation (r, θ) , θ' désigne l'angle entre le vecteur R et l'axe perpendiculaire au transducteur, et $p_0(x)$ est la pression

au niveau plan du transducteur.

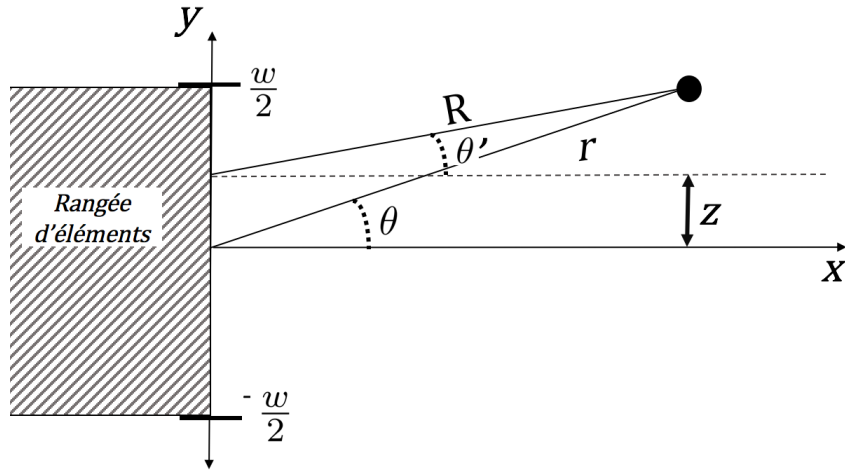


FIGURE 2.10 – Diagramme schématisé d'une rangée d'éléments émettant des radiations.

Dans un espace à deux dimensions, la fonction Green requise aura la forme de fonction Hankel. Pour $2\pi R \gg 1$, l'équation 2.29 devient :

$$p(r, \theta) = \frac{p_0}{j\lambda^{1/2}} \int_{-\frac{1}{2}w}^{\frac{1}{2}w} p_0(x) \frac{e^{2j\pi R/\lambda}}{R^{\frac{1}{2}}} \cos\theta' dx \quad (2.30)$$

Pour les points situés à une distance telles que $\theta \approx \theta'$ et $R \approx r$, $R \approx r - x \sin \theta$. Ce qui conduit au résultat suivant :

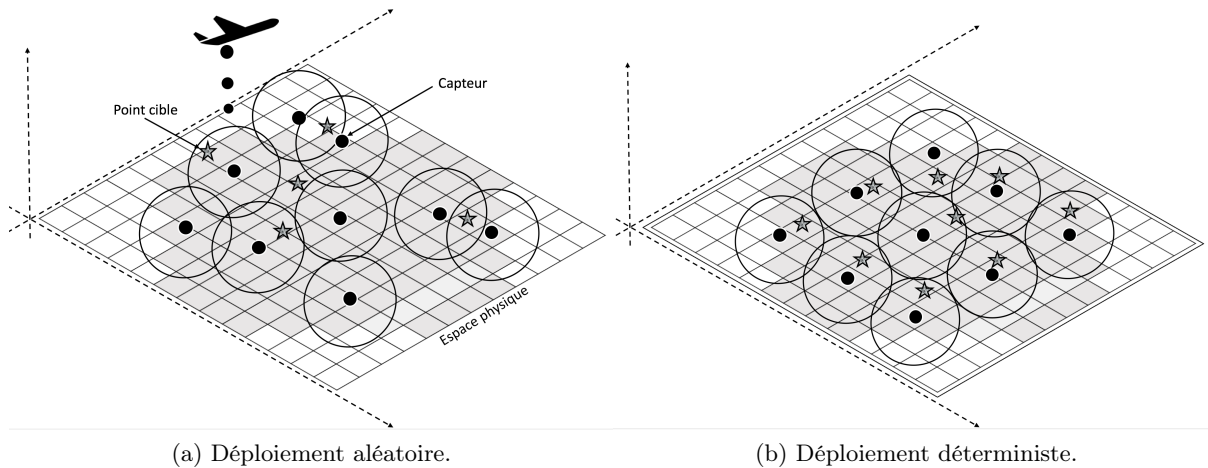
$$p(r, \theta) = \frac{p_0 \omega}{j\lambda^{1/2}} e^{\frac{2j\pi r}{\lambda}} \frac{\sin(\pi \omega / \lambda \sin \theta)}{\pi \omega / \lambda \sin \theta} \cos \theta \quad (2.31)$$

En considérant cette équation, on peut constater la présence d'un produit de $\cos \theta$ sur l'équation de rayonnement angulaire. En considérant la propagation du signal acoustique comme des ondes se propageant sur un médium donné, l'expression de l'intensité du signal basée sur l'équation de diffraction de Rayleigh-Sommerfeld ajoute une expression de plus au produit de l'équation initiale.

2.6 Déploiement physique

Le déploiement consiste à positionner sur un terrain donné un ou plusieurs capteurs afin de capturer des données relatives à un phénomène physique. Un capteur peut être déployé de façon déterministe ou aléatoire, selon le type de terrain et la nature de l'élément physique à mesurer dans la zone de déploiement. Un déploiement déterministe est faisable lorsque le terrain est accessible, alors qu'un déploiement aléatoire est la seule alternative lorsque l'objet d'étude se trouve dans une zone inaccessible. La figure 6 illustre les deux types de déploiement.

Un déploiement dense consiste à placer plusieurs capteurs dans une zone d'intérêt de façon à augmenter le chevauchement entre les zones de couverture des capteurs. Un déploiement peut être



(a) Déploiement aléatoire.

(b) Déploiement déterministe.

FIGURE 2.11 – Déploiement déterministe vs aléatoire.

dense ou non dépendant des exigences de l'application. Généralement, un déploiement dense est requis dans un environnement inaccessible, où disperser les capteurs dans la zone ou autour des emplacements cibles augmente la probabilité de couvrir une portion plus importante de l'espace physique.

Un des problèmes majeurs du déploiement déterministe c'est l'optimisation du placement des capteurs dans la zone d'intérêt de façon à satisfaire un certain nombre d'objectifs en ce qui concerne la couverture de la zone. Beaucoup de techniques ont été proposées dans la littérature. Celles-ci se basent souvent sur le modèle de couverture des capteurs et sur des techniques d'optimisation géométriques.

L'étude du déploiement constitue un préalable à la gestion de la couverture. Les capteurs une fois sur le terrain, deviennent opérationnels, capturent et reportent des données vers un point du réseau (point de collecte). Le déploiement influe grandement sur la qualité de la couverture. Un capteur ne détecte des données que sur son champ de couverture, lequel est déterminé par les caractéristiques physiques du capteur, qui régissent sa zone géographique de contrôle. Afin de mettre en place une stratégie de couverture pour une zone donnée, l'utilisation de modèles capturant la relation physique entre le capteur et sa zone de de contrôle s'avère nécessaire.

2.7 Modèles de couverture

Un modèle de couverture fournit une mesure de la couverture d'un capteur considérant une zone donnée ou un ensemble de points discrets dans l'espace. Il est généralement défini en considérant la relation géométrique existante entre le capteur et l'espace physique. Il peut être exprimé par une fonction prenant en entrée l'angle et la distance entre la position d'un capteur donné et un point de l'espace, et retournant en sortie une mesure de la couverture du capteur par rapport à ce point. L'espace physique peut être modélisé selon une vue continue, ou par un ensemble de points avec des emplacements de référence pour les cap-

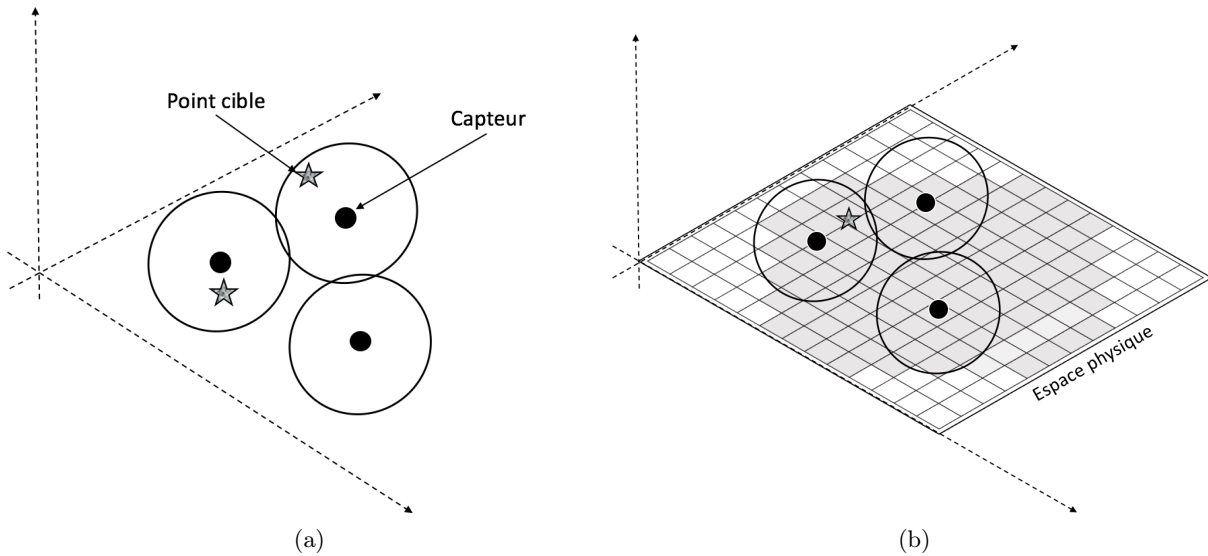


FIGURE 2.12 – Relation géométrique entre un capteur et une cible.

teurs et les éléments cibles, discrétisé de façon à faciliter les calculs de points. Les figures 2.12a et 2.12b illustrent ces deux cas de figures avec comme élément variant le modèle de terrain utilisé.

Il est possible de ne considérer la distance comme seul paramètre dans la relation entre capteur et emplacement cible. Dans ce cas, il est nécessaire de disposer des coordonnées précises des deux entités, pour le calcul de cette distance. Lorsque le terrain est représenté de façon discrète, il devient possible d'effectuer des calculs sans connaissance préalable de la position des éléments dans la zone de déploiement. La représentation du terrain telle qu'une grille de points, ou de cellules, avec un niveau de détails précis portant sur les éléments de composition de la cellule, permet d'appréhender l'essentiel des paramètres pouvant influencer sur la caractérisation de cette relation.

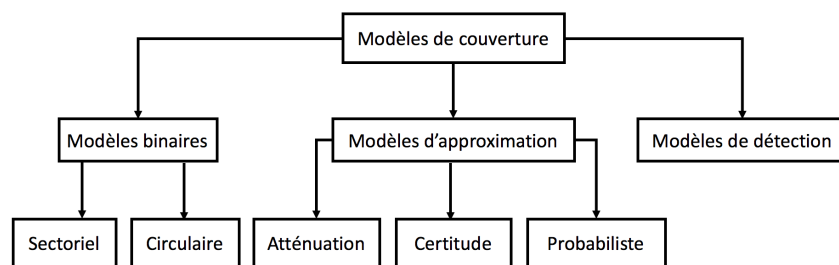


FIGURE 2.13 – Classification des modèles de couverture.

Compte tenu de la diversité des types de capteurs ainsi que les différents scénarios d'applications possibles, le modèle de couverture des capteurs peut être vu différemment. Plusieurs modèles de couverture ont été étudiés dans la littérature parmi lesquels : les modèles binaires à valeurs entières, les modèles d'approximation et de détection, où les mesures de couverture sont estimées dans des plages de valeurs réelles normalisées. Nous présentons les modèles de

couverture selon la classification montrée à la figure 2.13, en se basant essentiellement sur leurs formulations mathématiques.

D'une part nous avons les modèles de couverture binaires, et d'autre part nous avons des modèles d'approximation et de détection. Les premiers estiment la couverture d'un point avec des valeurs entières, alors que pour les deux autres les valeurs de couverture sont définies dans l'intervalle des valeurs réelles entre 0 et 1.

2.7.1 Modèles binaires

Modèle binaire sectoriel

Dans le modèle binaire sectoriel, la couverture est définie par rapport à l'angle visuel ω , l'angle d'orientation du nœud ϕ_s et au rayon de détection R_s . La fonction de couverture du modèle sectoriel peut être exprimée par l'équation 2.32.

$$f(d(s, z), \phi(s, z)) = \begin{cases} 1 & \text{si } d(s, z) \leq R_s \text{ et } \phi_s \leq \phi(s, z) \leq \phi_s + \omega \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.32)$$

$d(s, z)$ est la distance euclidienne entre un capteur s et un point cible z . $\phi(s, z)$ est l'angle entre la position du capteur s et celle du point z . L'équation 2.32 définit un secteur à l'intérieur duquel sont situés tous les points cibles couverts par s .

Les modèles sectoriels reflètent les modèles de transducteur au rayonnement directionnel¹. Cependant, ils considèrent l'existence d'un rayon de capture théorique représenté par R_s , délimitant la zone de couverture du capteur. Celle-ci est une portion de l'espace physique représentée par un secteur extrait d'un cercle avec un angle $\phi(s, z)$. La figure 2.14a illustre ce modèle.

Modèle binaire circulaire

Dans le modèle de couverture binaire circulaire, la couverture est définie par rapport au rayon de détection R_s et à la distance $d(s, z)$ séparant le capteur et un point de l'espace physique. C'est le modèle le plus utilisé dans les études sur la couverture. La zone de couverture d'un capteur est définie par un disque de rayon R_s dont le capteur est le centre ; tout point situé à l'intérieur de la surface du disque est dit couvert par s , avec une mesure égale à 1. La fonction de couverture du modèle circulaire est donnée par l'équation 2.33.

$$f(d(s, z)) = \begin{cases} 1 & \text{si } d(s, z) \leq R_s \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.33)$$

Le modèle circulaire d'un capteur est assimilable au modèle omnidirectionnel des transducteurs. Ce modèle apparaît avec un niveau d'abstraction avancé du système réel des capteurs omnidirectionnels, du fait qu'il suppose l'existence d'un rayon de capture fixe. Ce dernier définit un disque

1. A l'image d'un capteur d'images muni d'une caméra directionnelle.

de rayon R_s centré à la position du capteur. La figure 2.14b illustre ce modèle.

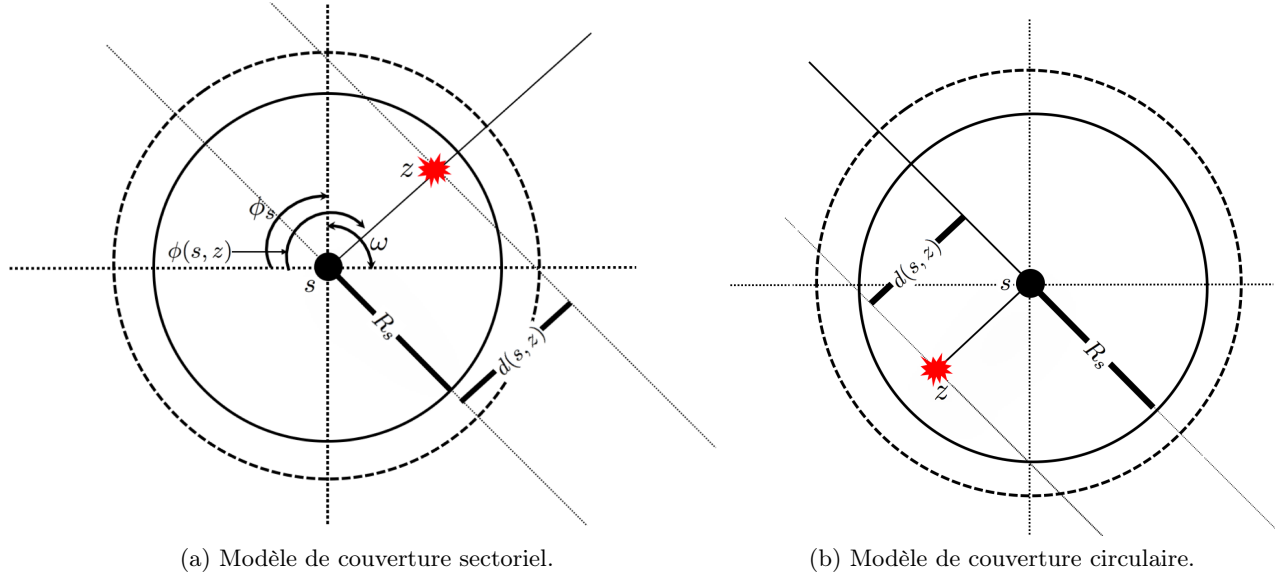


FIGURE 2.14 – Modèles de couverture circulaire et sectoriel.

Considérant l'illustration de la figure 2.14b, nous pouvons observer que le point cible z n'est couvert dans le premier modèle que s'il est placé sous l'angle d'orientation du champ de couverture du capteur représenté par le secteur du disque, et à une distance inférieure au rayon du disque, tandis que pour le modèle binaire (celui de droite), il suffit que la cible soit placée à l'intérieur du disque pour qu'elle soit dite couverte. Effectivement nous pouvons ramener ce cas au premier cas de couverture sectorielle en considérant cette fois-ci que l'angle spatial est de 360° .

2.7.2 Modèles d'approximation

Modèle d'atténuation de Megerian[63]

Le modèle circulaire atténué est un modèle de sensibilité décroissant d'un capteur par rapport à un point de l'espace physique. Le modèle décrit la réduction de la puissance de signal d'un capteur par rapport à la distance. Cette réduction de puissance décrit le comportement de quelque processus physique, dont l'amplitude du rayonnement est sensible à la distance et éventuellement à d'autres paramètres spécifiques. L'équation 2.34 a été proposée par [63].

$$f(d(s, z)) = \frac{C}{d(s, z)^\alpha} \quad (2.34)$$

Avec α le coefficient d'atténuation alors que C est une constante. C et α sont à spécifier tenant compte du type de capteur. Pour chaque point de l'espace, le modèle atténué définit une couverture représentée par une valeur positive. Les paramètres dépendant du capteur peuvent être estimés par des techniques de traitement de données expérimentales extraites des observations de capteurs.

Modèle d'atténuation de Zhou[103] et and Zou[99]

Considérant que la puissance de signal émis par un capteur suggère la probabilité de l'existence d'une cible, Zhou et al. ont proposé dans [99] un modèle d'évaluation de la couverture en utilisant une fonction exponentielle, pour représenter l'intensité du signal reçu par le capteur. Le modèle est basé sur la fonction définie par l'équation 2.35.

$$f(d(s, z)) = \begin{cases} e^{-\alpha d(s, z)} & \text{si } d(s, z) \leq R_s \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.35)$$

Avec α désignant les paramètres caractéristiques physiques du capteur et R_s le rayon de détection théorique [85].

Modèle d'atténuation d'Altinel[3]

Un autre modèle d'atténuation est celui de [3], où la mesure de couverture d'un point diminue avec la distance. Cette diminution est visible lorsque la distance entre le capteur et la cible est supérieure au rayon de capture R_s . Lorsque la distance est inférieure à R_s , alors la cible est complètement couverte par la source (mesure de couverture égale à 1). L'équation 2.36 décrit la formulation mathématique de cette relation de couverture. Le paramètre k du modèle est dépendant de la nature du capteur, et des caractéristiques de l'environnement d'opération, et peut être estimé de façon empirique.

$$f(d(s, z)) = \begin{cases} 1 & \text{si } d(s, z) \leq R_s \\ e^{-kd(s, z) - R_s} & \text{si } d(s, z) > R_s \end{cases} \quad (2.36)$$

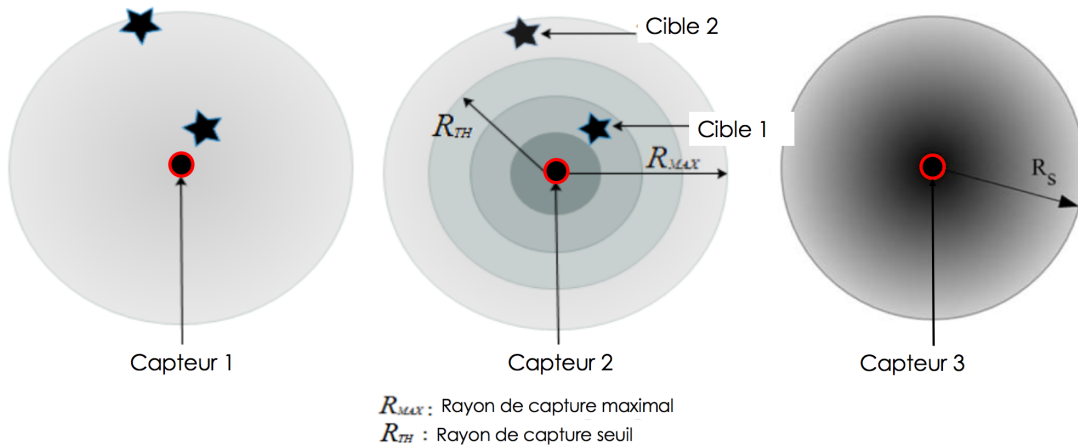


FIGURE 2.15 – Modèle de couverture atténuée vs modèle de couverture binaire.

2.7.3 Modèles de certitude

Lorsque la distance séparant un capteur à un point cible devient très grande, les valeurs fournies par la couverture ont tendance à se rapprocher de zéro. Ceci permet de restreindre la

zone de capture d'un capteur à une certaine portée. Dans cette optique, certains travaux ont introduit la notion d'incertitude dans les modèles existants, afin d'en dériver des modèles à seuil, applicables lorsque la distance entre le capteur et la cible est au-delà d'une certaine valeur. Au delà du seuil, la couverture entre un point et une cible peut être considérée comme négligeable. Dans la littérature, beaucoup de variantes de modèles ont été proposées, prenant en compte cet aspect d'incertitude. Le capteur 2 de la figure 2.15 illustre un tel modèle, avec R_{th} le rayon seuil et R_{max} le rayon maximal.

La détection d'un événement entre un capteur et une cible est représentée par une fonction, produisant une valeur de couverture bornée autour d'une valeur seuil et d'une valeur maximale. Un exemple de ces modèles est le modèle de Elfes[34] représenté par l'équation 2.37.

$$\begin{cases} 1, & \text{si } d \leq R_{th} \\ \exp^{-\lambda(d-R_{th})^\gamma}, & \text{si } R_{max} > d > R_{th} \\ 0, & \text{si } d \geq R_{max} \end{cases} \quad (2.37)$$

Ce modèle considère deux rayons donnés : un rayon de capture maximale appelé R_{max} , et un rayon d'incertitude représentant la frontière de la portion de surface au-delà de laquelle la détection du signal n'est plus uniforme. Dans ce cas, elle est représentée par une fonction exponentielle prenant en entrée les paramètres λ et γ , ajustables en fonction des propriétés physiques du capteur.

2.7.4 Modèles de détection d'évènement

Etant donné un capteur s et une cible z , émettant une source de signal de façon uniforme dans toutes les directions, et P_{th} une valeur de détection seuil, alors la détection d'une cible z par un capteur s peut être exprimée par la règle définie dans l'équation 2.38 [1].

$$P_f \left(O \left(\frac{\theta}{d_{(s,z)}} \right), \mathcal{H}(\eta) \right) \geq P_{th} \quad (2.38)$$

Avec $O \left(\frac{\theta}{d_{(s,z)}} \right)$, une fonction régissant la propagation du signal de puissance θ sur une distance $d(s, z)$ depuis la source du signal, et $\mathcal{H}(\eta)$ une fonction régissant le bruit.

La probabilité de détection P_s^z de la cible z par le capteur s est donnée dans l'équation 2.39.

$$P_s^z = Pr \left[P_f \left(O \left(\frac{\theta}{d_{(s \rightarrow z)}} \right), \mathcal{H}(\eta) \right) \geq P_{th} \right] = Q(P_{th}) \quad (2.39)$$

La détection est calculée par la fonction Q définie comme suit :

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp \left(-\frac{u^2}{2} \right) du \quad (2.40)$$

2.7.5 Discussion sur les modèles

Les figures de 2.16a à 2.16d illustrent à travers des représentations graphiques les tendances des modèles présentés ci-dessus. Le modèle binaire est graphiquement représenté en considérant le rayon de couverture R_s en abscisse, de sorte que la valeur de couverture correspondante soit égale à 1 au seul cas où la distance entre l'emplacement cible et la position du capteur est inférieure au rayon considéré.

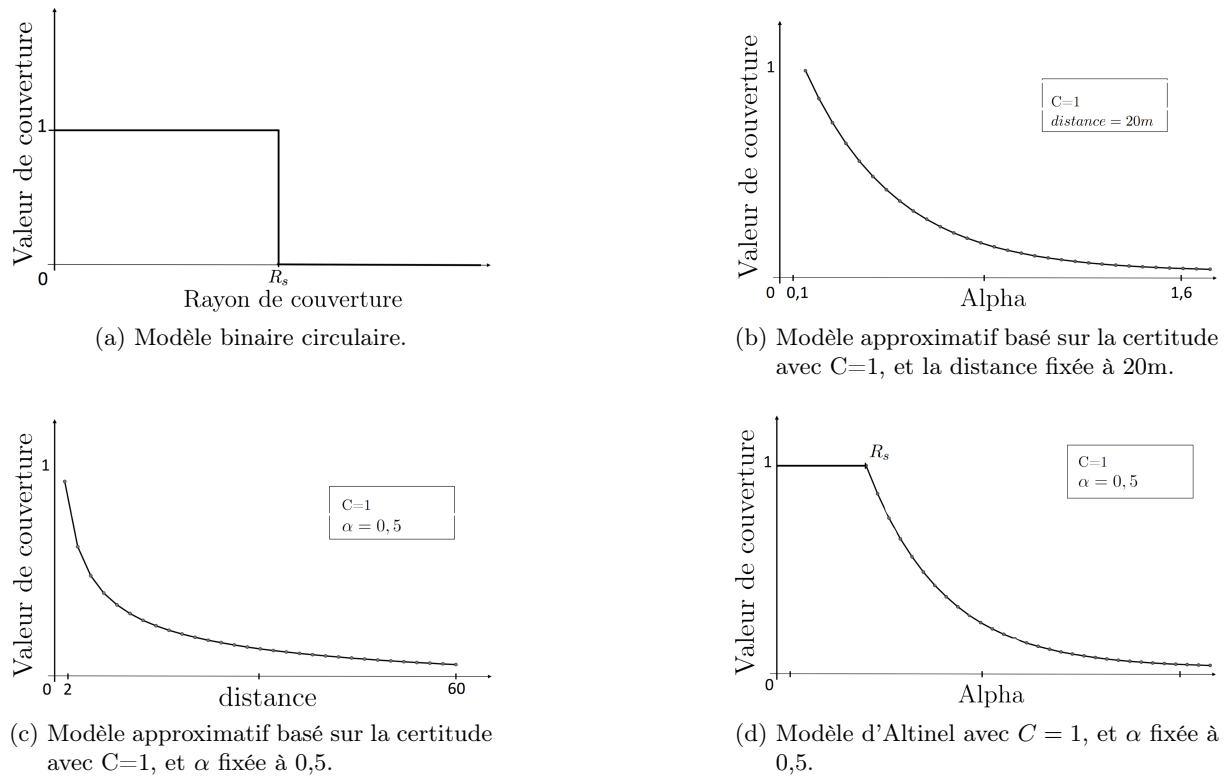


FIGURE 2.16 – Modèles de couverture et d'atténuation de signal.

Les figures 2.16b et 2.16c donnent des représentations graphiques de la fonction 2.34 avec différents paramètres. Lorsque la constante C est fixée à 1, et que la distance considérée est de 20m, la valeur de couverture décroît avec l'augmentation du paramètre α . De même que lorsque la constante est fixée à 1, et que le paramètre α est fixé, la valeur de couverture décroît plus rapidement en faisant varier la distance de 2 à 60m, comme illustré sous la figure 2.16c.

En considérant les allures des courbes pour chacune des fonctions présentées ci-dessus, la sensibilité de chacun des modèles par rapport à ses paramètres est mise en évidence. En faisant varier un des paramètres, et en exprimant la valeur de couverture en fonction de ce paramètre, nous constatons que la sensibilité est moindre en comparant les comportements des équations 2.35 et 2.34. La valeur de couverture décroît moins avec la distance en considérant l'équation 2.35.

En considérant l'allure de la courbe du modèle d'Altinel [3] dans la figure 2.16d, il est comode d'identifier deux parties distinctes sur le graphique. La première représente les valeurs de

couverture égales à 1 lorsque la distance entre l'objet cible et la position du capteur est inférieure à un rayon seuil R_{th} . Sinon, une fonction quasi-similaire à la fonction exponentielle donnée dans l'équation 2.35 est calculée afin d'estimer la valeur de couverture correspondante. Ce modèle définit deux zones distinctes qui sont : une première zone très proche du capteur avec un rayon R_{th} délimitant un espace sous forme de disque caractérisant une zone de certitude, et une zone d'incertitude marquée par la frontière abstraite de la zone de certitude.

Dans la pratique, un transducteur est un équipement produit en laboratoire, testé et calibré à un fonctionnement étant le plus souvent déterministe. En révisant le cas des transducteurs acoustiques et ultrasoniques, il est possible de se baser sur la représentation spatiale du rayonnement angulaire, pour planifier une stratégie de couverture lors d'un déploiement. La puissance de rayonnement émise depuis une source vers un emplacement donné est fortement dépendante de la forme, de la taille et de la fréquence du signal d'émission.

Lorsque qu'un capteur est déployé sur un terrain, différents aspects sont susceptibles d'influer le fonctionnement envisagé au préalable. Les signaux, de quelque nature qu'ils soient, sont sujets à des variations dans le temps et dans l'espace. Par exemple, pour un même lien de communication, il est possible de produire différentes valeurs de sortie aux temps t_0 et t_1 .

Les modèles de couverture permettent d'un point de vue théorique, de capturer la relation spatiale entre le capteur et son espace physique. Lorsque le signal est de nature à varier avec le temps, pour quelque raison que ce soit, la prise en compte de cet aspect est un point manquant dans ces modèles courants. Lorsque la distance est un paramètre important à prendre en compte dans ces modèles, les données climatiques (température, humidité relative ...) ont dans certains cas des rapports complexes avec la nature du signal en entrée du capteur. Par exemple, il a été constaté que les ondes électromagnétiques peuvent être sensibles à l'humidité, la température de l'air, et à la non homogénéité dans la distribution des composants atmosphériques caractérisant les chemins de propagation des signaux dans l'espace.

La qualité des données produites est également un aspect que les modèles de couverture courants ne représentent pas. Quelle portion d'espace est couverte par le capteur ? Est-ce dans la zone de déploiement ? Ceci pose le problème de la région, qui permet de garantir que la donnée produite par le capteur, est utile pour le système d'information en charge de l'exploitation des données. Au pire des cas, la capture et la génération de données provenant d'une source autre que l'emplacement cible, peut affaiblir le système de contrôle afférent, plus particulièrement dans un contexte d'applications critiques.

2.8 Conclusion

Pour en arriver aux modèles de couverture, ce chapitre a introduit dans un premier temps les concepts de base des capteurs, suivi d'une classification des capteurs et des méthodes mathématiques décrivant la génération de donnée par un capteur, à partir de mesures observées de l'environnement physique. Le rayonnement des transducteurs est décrit par illustration de

quelques cas de figures. En outre, une revue des formulations mathématiques de la relation capteur-point cible a été effectuée. Une discussion est proposée en fin de section basée sur des éléments de représentations graphiques de ces modèles. Le chapitre suivant effectue un état de l'art des problèmes de couverture dans la littérature.