

Radar transhorizon : Surmonter le « défi de l'aurore »

ALEXANDER MICHAEL DANIEL

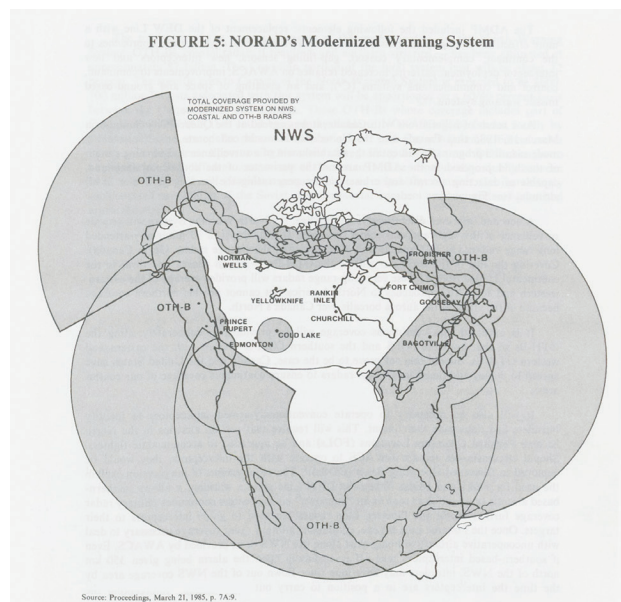
Alexander Michael Daniel est scientifique de la Défense et chercheur opérationnel au Centre d'analyse et de recherche opérationnelle (CARO) de Recherche et développement pour la défense Canada (RDDC). Il a obtenu une maîtrise en génie électrique et informatique à l'Université de Toronto en 2017, et a rejoint le Centre de recherche d'Ottawa de RDDC la même année, où ses recherches ont porté sur le traitement des signaux radar et la gestion des ressources. Depuis son arrivée au CARO en 2019, ses travaux ont porté à la fois sur les applications d'apprentissage automatique aux renseignements de source ouverte que sur la recherche opérationnelle à l'appui de la modernisation du NORAD. Il est actuellement membre de l'équipe de recherche opérationnelle NORAD du CARO à la base spatiale Peterson à Colorado Springs.

Le 20 juin 2022, lorsque la ministre canadienne de la Défense nationale (MDN) Anita Anand a annoncé le projet de création d'un « système de surveillance des voies d'approche du Nord » dans le cadre de l'approche du gouvernement canadien visant à moderniser le Commandement de la défense aérospatiale de l'Amérique du Nord (NORAD), trois initiatives ont été identifiées comme pilier du nouveau système.¹ Étant donné que deux de ces radars, le radar transhorizon (OTHR) « arctique » et l'OTHR « polaire », devaient être utilisés pour surveiller les zones les plus septentrionales du continent, on peut pardonner aux étudiants en histoire d'être sceptiques à l'égard de cette annonce : Le NORAD a déjà essayé—sans succès—d'utiliser l'OTHR dans l'Arctique. Un plan de 1967 visant à remplacer les radars du réseau d'alerte avancée (réseau DEW) dans le nord reposait en grande partie sur l'utilisation de la technologie OTHR, moins coûteuse.² Si, à l'époque de la publication du plan, un certain scepticisme régnait déjà quant à la viabilité de l'OTHR orientée vers le nord, au milieu des années 70, l'« optimisme initial » qui existait avait « considérablement diminué ».³ Une décennie s'est écoulée sans grand résultat, et le plan de 1985 visant à remplacer le réseau DEW prévoyait d'utiliser l'OTHR pour regarder dans toutes les directions, sauf le nord (voir figure 1).⁴ En effet, dans leur récent (et excellent) ouvrage, les experts du NORAD Andrea Charron et James Fergusson ne consacrent qu'une seule phrase douteuse à la perspective d'utiliser l'OTHR pour remplacer le système d'alerte du Nord (SAN) vieillissant : « ...les radars transhorizons peuvent apporter une solution (en supposant que le problème posé par les variations atmosphériques à haute altitude puisse être résolu)... ».⁵

Le MDN a-t-il eu tort de confier notre flanc nord à une technologie avec ce bilan? Cet article montre pourquoi la réponse à cette question est négative. Il donne un aperçu de l'histoire de l'OTHR en Amérique du Nord, entrecoupé d'intermèdes techniques qui, ensemble, illustrent le fonctionnement général de l'OTHR, les raisons de l'échec des tentatives précédentes d'utilisation pour

la surveillance de l'Arctique et la manière dont les innovations récentes en ont fait un choix viable pour un NORAD modernisé.

Figure 1 : Carte de l'Amérique du Nord montrant la couverture radar du plan de modernisation du système de surveillance du NORAD de 1985. Les OTHR sont utilisés pour la surveillance dans toutes les directions, à l'exception du nord, où les radars terrestres du Système d'alerte Nord sont utilisés.



Brève histoire du développement de l'OTHR en Amérique du Nord

Au cours de la Seconde Guerre mondiale, le radar a, selon un auteur, « modifié les bases de la guerre plus profondément que n'importe laquelle des inventions qui ont marqué l'industrialisation du combat »[TCO].⁶ Après la guerre, la recherche sur les radars s'est poursuivie de manière proportionnelle.⁷ Des groupes

dans plusieurs pays se sont intéressés au développement du radar haute fréquence (HF), car, dans cette bande (3-30 MHz), les ondes ont des modes de propagation uniques qui peuvent permettre la détection de cibles au-delà de l'horizon habituel de la ligne de visée du radar.⁸ En 1956, le Naval Research Laboratory (NRL) a réalisé avec succès des expériences « définitives » montrant qu'un radar HF pouvait envoyer une onde à travers l'ionosphère terrestre pour illuminer un avion situé au-delà de l'horizon et, par la suite, détecter les échos de cette illumination à l'aide d'un récepteur.⁹ En d'autres termes, ils ont démontré la possibilité d'un radar « transhorizon ».

Motivé par ce succès et par les progrès contemporains des techniques de traitement des signaux, le NRL a commencé immédiatement après à développer le « Magnetic Drum Radar Equipment » (MADRE) dans la baie de Chesapeake. Le MADRE a commencé à fonctionner à plein régime à l'automne 1961, et le NRL a rapidement été en mesure de détecter et de suivre les vols commerciaux de passagers au-dessus de l'océan Atlantique; « l'objectif principal du programme, à savoir l'augmentation d'un ordre de grandeur de la portée pour la détection et le suivi des avions, a été atteint »[TCO].¹⁰ Au début des années 60, un effort distinct a été entrepris à Stanford pour développer le « Wide Aperture Research Facility » (WARF), avec deux sites en Californie. Le WARF a amélioré le MADRE en offrant une meilleure résolution spatiale dans ses mesures et a finalement influencé la conception des systèmes OTHR ultérieurs aux États-Unis et en Australie.¹¹

Au tournant du siècle, les États-Unis ont mis en service plusieurs systèmes d'OTHR opérationnels. Il s'agit notamment du AN/FPS-95 (nom de code « Cobra Mist »), construit à la fin des années 60 en collaboration avec le Royaume-Uni sur la côte est de l'Angleterre dans le but de surveiller les activités aériennes et de missiles en Union soviétique. Après que les essais scientifiques commencés à la mi-1971 ont révélé des erreurs techniques insolubles, le programme a finalement été interrompu au cours de l'été 1973, et le radar a été démantelé et retiré du site d'essai.¹² Le AN/FPS-118 a été développé à la fin des années 70 et a été inclus dans le plan de 1985 visant à moderniser l'architecture d'alerte du NORAD; voir les radars OTH-B (radar transhorizon à réflexion troposphérique)¹³ dans la figure 1 et la discussion ci-dessous. Bien que deux de ces radars aient été construits (un sur la côte est et un sur la côte ouest États-Unis), le programme a finalement été arrêté après la fin de la guerre froide, car ils n'étaient plus jugés nécessaires.¹⁴ Enfin, l'OTHR « relocalisable » (ROTHR) AN/TPS-71—ainsi nommé parce qu'il peut être emballé à un endroit et transporté/reconstruit à un autre—a été mis au point au milieu des années 80. Motivés à l'origine par la menace des bombardiers dans les airs et des porte-missiles en mer, les ROTHR, situés en Virginie, au Texas et à Porto Rico (et orientés vers le sud), sont aujourd'hui principalement utilisés pour la lutte contre la drogue.¹⁵ En effet, ces systèmes sont toujours utilisés aujourd'hui : en 2021, Raytheon a remporté un contrat de cinq ans pour l'exploitation et l'entretien des systèmes de ROTHR,

qui auraient « contribué à la saisie de 26 tonnes de cocaïne sur des trafiquants de drogue qui tentaient d'entrer sur le territoire américain »[TCO] en 2020.¹⁶ De tels résultats permettent de comprendre l'affirmation de Joseph Thomason, scientifique au NRL, selon laquelle l'OTHR est « l'une des réalisations les plus importantes en matière de radar depuis la Seconde Guerre mondiale »[TCO].¹⁷

Intermède technique 1 – Comment fonctionne l'OTHR?

Bien que les détails deviennent très complexes, il existe deux principes de base communs à tous les OTHR qu'il est nécessaire de comprendre dès à présent afin de donner un sens au « défi de l'aurore ». Le premier principe est celui de la *réfraction*, c'est-à-dire la façon dont les ondes électromagnétiques changent de direction à l'interface entre deux milieux différents dans lesquels l'onde se propage. La réfraction est causée par les changements de vitesse de l'onde lorsqu'elle pénètre dans le nouveau milieu et c'est ce qui provoque les arcs-en-ciel et l'apparence qu'une paille se plie lorsqu'elle est immergée dans un verre d'eau (figure 2).¹⁸ La figure 3 illustre les concepts pertinents pour cet article. Tout d'abord, lorsqu'une onde passe d'un milieu plus lent à un milieu plus rapide, elle s'incurve *vers* la frontière. Deuxièmement, lorsque l'onde incidente s'approche de la frontière, elle atteint un point où l'onde réfractée devient parallèle à la frontière—l'angle auquel cela se produit est appelé *angle critique*. Troisièmement, lorsque le rayon incident est encore plus proche de la frontière, il n'y a pas de réfraction du tout. Le rayon se réfléchit simplement dans le milieu plus lent, un phénomène connu sous le nom de *réflexion totale interne*.¹⁹

Figure 2 : Une paille dans un verre d'eau. La réfraction de la lumière fait apparaître la paille courbée et disjointe dans l'eau.



Certaines ondes électromagnétiques émises par le soleil ont une énergie si élevée que, lorsqu'elles touchent l'atmosphère terrestre, elles ionisent les gaz qu'elles rencontrent, c'est-à-dire qu'elles créent des particules chargées d'électricité. Cette couche atmosphérique de gaz ionisé (techniquement, un *plasma*), qui s'étend d'environ 50 à 1 000 km au-dessus du sol, est connue sous le nom d'ionosphère. La forte présence de particules chargées dans l'ionosphère la différencie suffisamment de l'atmosphère neutre que nous connaissons au niveau du sol pour permettre la réfraction à la fois au niveau de l'ionosphère et à l'intérieur de celle-ci.²⁰ La figure 4 illustre de manière exagérée²¹ la manière dont les OTHR peuvent utiliser la réfraction ionosphérique pour envoyer des ondes à travers l'ionosphère et les renvoyer vers la terre. Lorsque l'onde pénètre dans ce modèle réduit d'ionosphère composé de couches distinctes, elle subit une réfraction vers la limite de chaque couche. Lorsque l'angle est si grand qu'une réflexion interne totale se produit, l'onde est renvoyée vers la terre (où elle subit à nouveau plusieurs réfractions). C'est la *propagation par ondes ionosphériques* qui permet au radar de détecter des cibles au-delà de l'horizon de visibilité directe.

Figure 3 : Illustration de la réfraction (ligne bleue continue), de l'angle critique (ligne pointillée rouge) et de la réflexion interne totale (ligne pointillée magenta), pour une onde électromagnétique se déplaçant d'un milieu lent vers un milieu plus rapide.

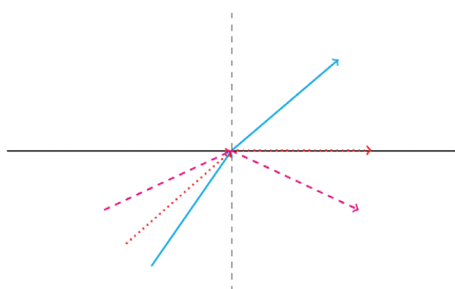
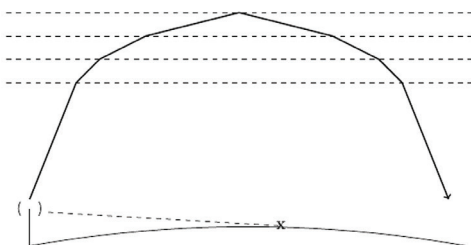


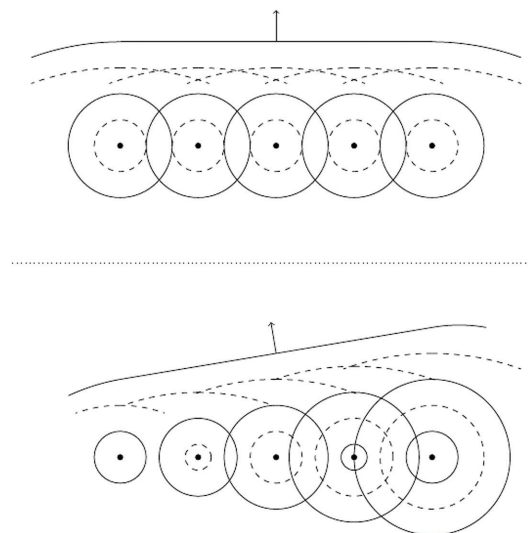
Figure 4 : Illustration de la propagation de l'onde ionosphérique par réfraction à travers un modèle réduit d'ionosphère composée de couches distinctes et homogènes. L'onde ionosphérique est capable de voir bien au-delà de l'horizon de visibilité directe du radar.



Le deuxième concept important est la *formation de faisceaux* des réseaux d'antennes. L'analogie ici est celle des cailloux dans un étang. Un simple caillou, lâché dans l'eau, produit des ondulations circulaires qui partent du caillou. Cependant, lorsque plusieurs cailloux sont lâchés, les ondes qu'ils produisent subissent des

interférences constructives et destructives, produisant des motifs bien plus compliqués que ceux qu'un seul caillou pourrait produire. Les antennes, comme les cailloux, produisent des ondes avec des motifs spatiaux distinctifs. Lorsque les sorties de plusieurs antennes sont combinées avec soin, elles peuvent elles aussi produire des motifs cumulatifs qui n'ont rien à voir avec ce qu'une seule antenne pourrait faire individuellement. La figure 5 illustre de manière exagérée un réseau *linéaire* d'antennes (ou de cailloux) qui produisent individuellement des ondes uniformes dans toutes les directions. Lorsque toutes les antennes sont activées en même temps, l'interférence nette (à des distances éloignées du réseau) est bien approximée par une onde unique se propageant normalement au réseau. Cependant, lorsque les antennes émettent des ondes avec un léger décalage, la direction de l'onde cumulée n'est plus normale au réseau. Le contrôle du décalage permet de contrôler la direction de l'onde transmise. Un traitement analogue peut être effectué avec un réseau de réception, ce qui permet au radar, par exemple, de réduire considérablement les retours (tels que les interférences ou les brouillages délibérés) provenant de certaines directions.²²

Figure 5 : Illustration de la façon dont la combinaison des sorties d'antennes individuelles peut produire des ondes planes dans différentes directions.



La propagation de l'onde ionosphérique peut permettre aux systèmes de détecter des cibles jusqu'à 4 000 km, alors que les systèmes opérationnels ont toujours eu des réseaux d'antennes capables d'envoyer des ondes à des angles de 30 à 45 degrés à gauche et à droite de la normale.²³ Un seul OTHR peut donc couvrir des millions de kilomètres carrés, ce qui a conduit les scientifiques du NRL James Headrick et Joseph Thomason à le décrire comme « le capteur le plus économique sur la base d'un dollar par mile carré, lorsque ses produits et sa fiabilité satisfont à la mission »[TCO].²⁴

L'échec de l'OTHR dans le Nord

Headrick et Thomason ne sont pas les seuls à avoir apprécié les économies possibles grâce à l'OTHR. Bien que les radars du réseau d'alerte avancée (réseau DEW) n'aient été achevés qu'en 1957, les planificateurs de la défense continentale ont envisagé de la remplacer par l'OTHR (entre autres) dès 1967.²⁵ Le réseau DEW était coûteux à exploiter et, composé de radars terrestres dans l'extrême nord, il constituait une série de cibles faciles pour les adversaires, ne leur offrant qu'une capacité limitée de détection en visibilité directe. Sur ces trois fronts, l'OTHR semblait constituer une amélioration.²⁶ En effet, le plan estimait que le fonctionnement du système actuel coûtait 903 millions de dollars américains par an, alors que le système de remplacement proposé, OTHR inclus, ne nécessiterait que 342 millions de dollars américains par an.²⁷

Le plan de 1967 comprenait une disposition approuvant « une force programmée de deux sites [OTHR] à partir de [TCO] » l'exercice financier 1973.²⁸ En 1972, ce plan avait été considérablement révisé—l'objectif de 1973 n'aurait pas été atteint—pour passer à 4 OTHR, chacune avec une couverture de 180 degrés, avec une capacité opérationnelle initiale (COI) d'ici 1977-1978.²⁹ Lorsque l'on connaît les difficultés rencontrées pour résoudre les problèmes d'encombrement auroral pour les OTHR orientés vers le nord—voir l'interlude technique 2 ci-dessous—ce retard est facile à comprendre. L'OTHR expérimental « Polar Fox II » a été construit au cours de l'été 1971 à Caribou, dans le Maine, et a été utilisé pour des expériences d'OTHR orientées vers le nord en 1971 et 1972.³⁰ Le rapport de l'une des expériences résume bien les difficultés : « Dans des conditions défavorables, qui se produisent assez souvent dans les régions arctiques au nord de 60° de latitude géomagnétique, un radar de rétrodiffusion ne peut voir le sol que dans des sections de portée très limitée. » [TCO]³¹ Les essais ultérieurs « Polar Cap III » ont commencé en décembre 1972, avec un émetteur et un récepteur à Hall Beach et un second récepteur à Cambridge Bay (aujourd'hui tous deux au Nunavut). Les « résultats médiocres » obtenus en 24 mois ont conduit « les planificateurs à conclure », en 1975, « que le problème des aurores ne pouvait être résolu pour l'instant et à demander que des études sur d'autres approches soient entreprises » [TCO].³²

Ces résultats ont nécessité un renversement de la décision prise en 1973 de fermer le réseau DEW (et de la remplacer par l'OTHR) d'ici 1976. En effet, les perspectives de l'OTHR étaient telles à l'époque qu'en 1976, le secrétaire américain à la défense Harold Brown a failli annuler complètement le programme, bien qu'il ait lui-même été à l'origine du plan de 1967 qui a évoqué pour la première fois la possibilité d'utiliser l'OTHR pour la surveillance du Nord. Bien que le programme OTHR ait finalement survécu, Brown n'a pas eu d'autre choix que d'approuver le nouveau projet « Seek Frost » en 1977, qui prévoyait de remplacer le réseau DEW, vieux d'une vingtaine d'années, par des radars terrestres modernisés.³³ Lorsqu'un accord de modernisation du réseau DEW a finalement été conclu en 1985,³⁴ les OTHR (en

particulier les radars AN/FPS-118 ou « OTH-B ») devaient être utilisés pour la surveillance dans toutes les directions sauf le nord (figure 1) : le défi de l'aurore n'a pas pu être surmonté.

Intermède technique 2 – Le défi de l'aurore

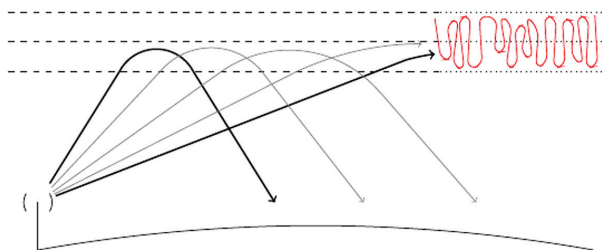
Prenons l'exemple d'une personne conduisant dans la direction du soleil au coucher du soleil (figure 6). Le soleil est suffisamment bas dans le ciel pour apparaître dans son champ de vision et, en raison de l'intensité de la lumière directe du soleil, il domine la lumière qui se reflète sur la route et les véhicules qui se trouvent devant lui.

Figure 6 : La lumière directe du soleil gêne la vision de la route. Illustration fournie par Sarah Tierney, équipe de documentation visuelle scientifique de RDDC.



Un problème analogue se pose avec les OTHR orientés vers le nord (bien que, comme nous le verrons, il ne soit pas dû à une source externe d'interférence, mais plutôt à une blessure auto-infligée). Les interactions complexes entre l'ionosphère, le champ magnétique terrestre et les vents solaires produisent des irrégularités à grande vitesse dans le plasma ionosphérique qui « réfléchissent très efficacement les ondes radio [TCO] ». ³⁵ La figure 7 montre comment cela devient un problème pour les OTHR orientés vers le nord. Un OTHR basé sur un réseau d'antennes linéaires (évoqué dans l'intermède technique précédent) nécessite un faisceau large pour assurer « l'illumination de la cible à tous les angles d'élévation possibles ». ³⁶ La figure 7 montre comment, alors que certaines parties de ce large faisceau sont réfractées à travers l'ionosphère vers la terre, d'autres parties illuminent les irrégularités du plasma auroral. Les deux lignes noires épaisses de la figure 7 ont approximativement la même longueur, de sorte que toute cible éclairée par le rayon noir supérieur apparaîtra approximativement à la même distance que les irrégularités éclairées par le rayon noir inférieur : la portée ne peut donc pas être utilisée pour distinguer les cibles de l'encombrement. ³⁷ Un calcul de coin de table peut être utilisé pour montrer que les retours de l'encombrement auroral peuvent être des ordres de grandeur plus puissants que les retours des cibles prévues. ³⁸ En effet, ils peuvent « neutraliser » un OTHR. ³⁹

Figure 7 : Le faisceau large d'un OTHR peut éclairer les irrégularités ionosphériques (gribouillis rouge).



Il est à noter que ce n'est pas seulement la *présence* d'encombrements qui est si difficile à gérer. À toutes les latitudes, les OTHR doivent faire face à l'encombrement de la surface de la Terre, qui réfléchit également les émissions du radar dans sa direction. Ce qui rend l'OTHR possible, c'est le fait que ces retours sont généralement « bien limités dans leur contenu spectral aux très basses fréquences Doppler » [TCO].⁴⁰ En d'autres termes, la surface de la Terre et les objets qui s'y trouvent se déplacent à des vitesses relativement faibles, de sorte que les cibles à grande vitesse, comme les avions, peuvent être distinguées de l'encombrement de surface à faible vitesse en tenant compte de la *vitesse* des cibles détectées, c'est-à-dire du décalage Doppler des ondes renvoyées.⁴¹ En revanche, les irrégularités du plasma à l'origine de l'encombrement auroral peuvent se déplacer suffisamment rapidement pour masquer les avions à grande vitesse, de sorte qu'il n'est généralement pas possible de différencier l'encombrement auroral des cibles à l'aide du décalage Doppler.⁴² Tel est donc le défi de l'aurore : les OTHR orientés vers le nord ne peuvent pas distinguer l'encombrement auroral des cibles légitimes recherchées, que ce soit en matière de distance ou de vitesse, les deux moyens les plus fondamentaux par lesquels les radars en général détectent leurs cibles.

L'OTHR dans le nouveau millénaire

Une fois de plus, nous nous tournons vers Joseph Thomason, du NRL, qui, en 2003, décrit le dernier cri en matière d'OTHR à l'époque : « La conception de tous les radars opérationnels HF à ondes ionosphériques (c'est-à-dire OTHR) repose en grande partie sur une réflexion et une technologie datant des années 1970. [TCO] »⁴³ Le nouveau millénaire pourrait-il offrir de nouvelles possibilités et approches en matière d'OTHR dans le Nord?

Depuis 2006, des chercheurs de Recherche et développement pour la défense Canada (RDDC), sous la direction du Dr Ryan Riddolls, explorent précisément cette possibilité : « On s'est rendu compte que les techniques d'OTHR de la prochaine génération proposées pour les systèmes des latitudes moyennes, telles que les réseaux d'antennes planaires et les méthodes à entrées et sorties multiples, pouvaient être appliquées pour résoudre les problèmes uniques de l'OTHR des latitudes élevées » [TCO]⁴⁴ [références dans l'original omises] - voir l'interlude technique 3

ci-dessous. Outre une modélisation mathématique approfondie, des résultats expérimentaux ont été obtenus et analysés à l'aide de systèmes OTHR expérimentaux, notamment un réseau d'antennes de 256 éléments à Ottawa et un réseau de 1 024 éléments au Nunavut.⁴⁵ Cela distingue la période actuelle de modernisation du NORAD du plan de 1967 : ce dernier avait été mis en œuvre dans l'espoir que l'OTHR orienté vers le nord pourrait éventuellement être compris, alors que la première n'a lieu qu'après plus de 15 ans d'études et de développement sur ce même problème.

Intermède technique 3 - Surmonter le défi de l'aurore

Reprenons le conducteur de la figure 6. Le soleil envahi ses yeux et l'empêche de voir la route et les véhicules qui se trouvent devant lui. Hélas, les capteurs du conducteur (c'est-à-dire ses globes oculaires) ne lui permettent pas de « baisser » le soleil ou de « monter » la route. Le port de lunettes de soleil réduit l'intensité des rayons solaires, mais n'améliore pas le *contraste* entre le soleil et la route. Il existe néanmoins une caractéristique de cette interférence qui peut être exploitée pour l'atténuer : l'*élévation*. D'une manière générale, le soleil se trouve dans la partie supérieure du champ de vision du conducteur, tandis que la route ne se trouve que dans la partie inférieure. Le fait d'abaisser le pare-soleil de la voiture bloque les rayons incidents du soleil, ce qui permet au conducteur de voir à nouveau la route (figure 8).

Figure 8 : Traitement spatial pour annuler un brouilleur de faisceaux principaux, ou en d'autres termes, bloquer le soleil avec un pare-soleil. Illustration fournie par Sarah Tierney, équipe de Documentation visuelle scientifique de RDDC.



Une idée analogue peut être exploitée dans les systèmes d'OTHR modernes. Rappelons l'illustration de l'éclairage de l'irrégularité du plasma dans la figure 7. Bien que la partie du faisceau illumine le plasma, ce n'est que la partie inférieure du faisceau qui le fait. Même si l'encombrement auroral se produit aux mêmes distances et vitesses que les cibles légitimes, l'angle d'élévation permet de les distinguer, tout comme la différence d'élévation du soleil et de la route permet à Archie de bloquer l'un, mais pas l'autre.⁴⁶

Ce concept exige que le réseau d'antennes soit capable de faire la distinction entre différents angles d'élévation. Les réseaux d'antennes linéaires, tels qu'illustrés dans le premier interlude technique et utilisés dans tous les anciens OTHR dont il est question dans cet article, ne permettent une distinction qu'en azimut. L'ajout d'une deuxième dimension au réseau d'antennes, c'est-à-dire l'utilisation d'un réseau *planaire*, ajoute une deuxième dimension au contrôle angulaire, à savoir l'élévation. Les deux réseaux de test examinées dans la section précédente ne sont pas simplement (respectivement) des réseaux de 256 et 1 024 éléments—ce sont des réseaux carrés de 16 par 16 et de 32 par 32.⁴⁷

L'utilisation d'un réseau planaire permet, en principe, deux possibilités. Tout d'abord, lors de l'émission à l'aide d'un réseau planaire, le faisceau d'émission peut être orienté en élévation (comme l'orientation du faisceau en azimut a été illustrée à la figure 5) afin d'éviter de générer l'encombrement en premier lieu. Deuxièmement, lors de la réception à l'aide d'un réseau planaire, des techniques de traitement du signal peuvent être utilisées pour atténuer l'entrée provenant de certaines directions, comme indiqué dans le premier interlude technique. Il s'agit d'une analogie plus proche du conducteur et du pare-soleil. Ainsi, les directions contenant de l'encombrement auroral peuvent être supprimées, tandis que les directions dans lesquelles les cibles sont censées se trouver peuvent être (comparativement) amplifiées.

Conclusion

Malgré les difficultés rencontrées pour faire fonctionner l'OTHR dans le cadre de la surveillance de l'Arctique, le gouvernement n'a pas commis d'erreur en prévoyant que l'OTHR constituerait le « pilier » du futur système de surveillance des voies d'approche du Nord. Les OTHR qui ont été construits et utilisés à partir des années 60 étaient des réseaux linéaires capables de distinguer les cibles d'intérêt de l'encombrement terrestre (presque) stationnaire, mais pas de l'encombrement auroral qui masque les cibles en matière de distance et de vitesse. C'est le « défi de

l'aurore » qui a fait échouer toutes les tentatives d'utilisation des OTHR pour la surveillance de l'Arctique au cours du dernier tiers du 20^e siècle. Les OTHR modernes conçus par Ryan Riddolls et ses collègues à RDDC surmontent le problème des aurores en utilisant des réseaux planaires qui permettent à l'OTHR de faire la distinction entre la cible et l'encombrement auroral en élévation.

Il convient de noter que les détails essentiels au bon fonctionnement d'un système OTHR réel ont été éludés dans cet article afin de montrer que les principes de base sur lesquels fonctionne l'OTHR sont des concepts familiers de la vie quotidienne : les arcs-en-ciel, les cailloux dans un étang et le soleil dans les yeux lorsque l'on est au volant. Les lecteurs intéressés par des détails techniques plus poussés trouveront leur bonheur dans les documents rédigés par Riddolls et ses collègues, cités dans les notes de fin d'ouvrage.⁴⁸

Les deux sections précédentes ont opposé de manière défavorable la « pensée des années 1970 » des anciens OTHR aux approches plus modernes. Ce n'est pas tout à fait juste. Prenons une fois de plus les mots de James Headrick et Merrill Skolnik, scientifiques du NRL, qui écrivaient en 1974 : « L'antenne d'un radar HF transhorizon est probablement plus exigeante que celle de n'importe quelle autre application radar. L'antenne doit avoir un gain élevé, couvrir une gamme de fréquences extrêmement large, être orientable en élévation, être rapidement orientable sur un large azimut et supporter une puissance élevée » [TCO]⁴⁹ Cela signifie-t-il que les ingénieurs des années 70 auraient pu relever le défi de l'aurore? Riddolls prend leur défense : « Pour mettre les choses en perspective, il convient de noter que ces efforts historiques ont été menés à une époque où le traitement numérique des signaux et le traitement adaptatif des réseaux en étaient à leurs balbutiements, et où les techniques de téléguidage multicanal entièrement numériques n'étaient tout simplement pas disponibles pour la communauté des radars. » [TCO]⁵⁰ Ainsi, s'il est vrai que la *pensée* des années 1970 aurait pu suffire à relever le défi des aurores, la *technologie* des années 1970, elle, n'a pas pu le faire.

Notes

1 Gouvernement du Canada. 2022. *La ministre de la Défense nationale annonce un plan sur la modernisation du NORAD*. Le 22 juin. Consulté le 30 mars 2023. Tiré de : *La ministre de la Défense nationale annonce un plan sur la modernisation du NORAD* - Canada.ca

2 Une brève discussion de ce plan est fournie dans *Canada in NORAD, 1957-2007 : A History* (Montréal et Kingston : McGill-Queen's University Press, 2007), pages 66 à 68, de Joseph T. Jockel tandis que des comptes rendus plus détaillés peuvent être trouvés dans *CONAD Command History*, 1968. (Joint Staff Headquarters, CONAD, 1969), pages 1 à 3 et 59 à 78 du CONAD Command History Division et *The Aerospace Defense Command and Antibomber Defense, 1946-1972*, (ADC Historical Study No. 39, 1973), pages 161 à 163, de Richard F. McMullen.

3 David N. Spire, *North American Air/Aerospace Defense, 1972-1983* (NORAD Research Report [Contract #F49642-88-C5157], 1992), II-24. La pagination du livre de Spire

utilise des chiffres romains pour les chapitres et des chiffres arabes pour les numéros de page à l'intérieur d'un chapitre. Les expressions de scepticisme sont décrites, par exemple, dans Jockel, *Canada in NORAD*, 67-68.

4 Ce chiffre est tiré du Comité permanent des affaires extérieures et de la défense nationale. *NORAD 1986* (rapport de la commission de la Chambre des communes, 33^e législature, 1^{re} session, 1986), 29, qui contient également une discussion plus approfondie du plan. La figure est reproduite dans *Canada in NORAD* de Jockel en tant que « Carte 7 » en annexe. « Il est permis de reproduire les délibérations de la Chambre et de ses comités, en tout ou en partie, sur n'importe quel support, pourvu que la reproduction soit exacte et qu'elle ne soit pas présentée comme version officielle. Il n'est toutefois pas permis de reproduire, de distribuer ou d'utiliser les délibérations à des fins commerciales visant la réalisation d'un profit financier », extrait de « Avis importants », *Chambre des communes*. Tiré de :

<https://www.noscommunes.ca/fr/avis-importants>, consulté le 11 avril 2023.

5 Andrea Charron et James Fergusson, *NORAD : In Perpetuity and Beyond* (Montréal et Kingston : McGill-Queen's University Press, 2022), 83-84.

6 Louis Brown, *A Radar History of World War II: Technical and Military Imperatives* (New York: Taylor and Francis Group, 1999), 6.

7 Voir par exemple Merrill Skolnik, « Fifty Years of Radar », *Proceedings of the IEEE*, Vol. 73:2 (1985), 183-187.

8 J. M. Headrick et J. F. Thomason, « Applications of high-frequency radar », *Radio Science*, Vol. 33:4 (1998), 1045. Notez qu'il y a au moins deux façons pour l'onde de faire cela : via une *onde ionosphérique*, qui se propage à travers l'ionosphère terrestre, ou via une *onde de sol* ou de *surface*, qui adhère plus près de la surface de la Terre. Tous deux peuvent prétendre offrir une visibilité au-delà

- de l'horizon en visibilité directe et pourraient donc être raisonnablement appelés radars « transhorizon », mais nous utiliserons OTHR pour nous référer exclusivement à la propagation par onde ionosphérique dans cet article. Cet article n'aborde pas non plus le développement des OTHR en dehors de l'Amérique du Nord; voir, par exemple, Ryan J. Riddolls, *A Canadian Perspective on High-Frequency Over-the-Horizon Radar* (Recherche et développement pour la défense Canada, TM 2006-285, 2006), 28-29, pour une discussion et des sources sur la recherche australienne, française et chinoise sur l'OTHR.
- James M. Headrick et Merrill Skolnik, « Over-the-Horizon Radar in the HF Band », *Proceedings of the IEEE*, Vol. 62:6 (1974), 665.
- J. Headrick et J. Thomason, « The development of over-the-horizon radar at the Naval Research Laboratory », *2008 IEEE Radar Conference*, (2008) : 1-2; voir également Headrick et Skolnik, « Over-the-Horizon Radar in the HF Band », 671.
- Joseph F. Thomason, « Development of Over-the-Horizon Radar in the United States », 2003 *Proceedings of the International Conference on Radar*, (2003):599-601; Headrick et Thomason, « Applications of high-frequency radar », 1047. Lors de vos recherches sur le réseau OTHR australien, le Jindalee Operational Radar Network (JORN), veillez à ne pas le confondre avec l'album « Over the Horizon Radar » (2022) du groupe de métal norvégien Jørn.
- E. N. Fowle, E. L. Key, R. L. Miller et R. H. Sear, *The Enigma of the AN/FPS-95 OTH Radar* (The MITRE Corporation, 1979), 289-291; Thomason, « Development of Over-the-Horizon Radar in the United States », 600.
- Notez que le terme « OTH-B » est parfois utilisé (principalement dans la littérature historique, comme *North American Air/Aerospace Defense* de Spires) comme synonyme d'OTHR, tandis que d'autres fois (principalement dans la littérature technique, comme *Development of Over-the-Horizon Radar in the United States* de Thomason) comme un autre nom pour le radar AN/FPS-118 en particulier.
- Thomason, « Development of Over-the-Horizon Radar in the United States », 600; Jockel, *Canada in NORAD*, 145-146.
- Headrick et Thomason, « Applications of high-frequency radar », 1047-1050. Après la guerre froide et avant le 11 septembre, le NORAD a brièvement joué un rôle dans les opérations antidrogue : voir Jockel, *Canada in NORAD*, 147.
- Naval News Staff, « Raytheon Contracted For US Navy Counter Narco-Terrorism Operations Support », *Naval News*, 24 mars 2021. Tiré de <https://www.navalnews.com/naval-news/2021/03/raytheon-contracted-for-us-navy-counter-narco-terrorism-operations-support/>, consulté le 7 avril 2023.
- Thomason, « Development of Over-the-Horizon Radar in the United States », 599.
- David Halliday, Robert Resnick et Jearl Walker, *Fundamentals of Physics* (John Wiley and Sons Inc., 2011), 904-909.
- Ibid.*, 907-912.
- Voir Riddolls, *A Canadian Perspective on High-Frequency Over-the-Horizon Radar*, pages 3-4, pour un aperçu plus complet et K. G. Budden, *The Propagation of Radio Waves : The Theory of Radio Waves of Low Power in the Ionosphere and Magnetosphere* (Cambridge : Cambridge University Press, 1985), pages 1 à 20, pour un compte rendu plus détaillé.
- En effet, ce récit a occulté un certain nombre de détails compliqués et subtils afin d'illustrer les principes de base. Par exemple, un lecteur avisé ayant des connaissances en physique pourrait remarquer que la vitesse des ondes électromagnétiques dans la basse atmosphère est déjà très proche de la vitesse des ondes électromagnétiques dans le vide, la vitesse maximale autorisée par les lois de la relativité. Cependant, pour se courber vers la frontière, comme le montre la figure 4, l'onde dans l'ionosphère doit se déplacer *plus rapidement* qu'elle ne le faisait dans la basse atmosphère. La résolution de cette apparente antinomie nécessite des distinctions minutieuses entre des notions telles que la vitesse de *phase* et la vitesse de *groupe* des ondes, ce qui dépasse le cadre de cet article. Le lecteur intéressé (et courageux) est invité à consulter, par exemple, Leon Brillouin, *Wave Propagation and Group Velocity* (New York et Londres : Academic Press, 1960), pages 1 à 16, pour plus de détails. La modélisation précise de la propagation des ondes dans l'ionosphère est importante pour le succès d'un OTHR, et des modèles beaucoup plus détaillés que l'illustration de cet article ont été développés de manière concordante. Voir, par exemple, Thayanathan Thayaparan, Yousef Ibrahim, John Polak et Ryan Riddolls, « Over-the-Horizon Radar (OTHR) in Canada », *19th International Radar Symposium*, (2018) : pages 1 à 10.
- Des détails mathématiques peuvent être trouvés dans, par exemple, Joe Frank et John D. Richards, « Phased Array Radar Antennas », dans *Radar Handbook*, 3^e Edition, ed. Merrill Skolnik (New York : McGraw-Hill, 2008), 1311-1313.
- Voir, par exemple, les tableaux 20.1 et 20.2 dans James M. Headrick et Stuart J. Anderson, « HF Over-the-Horizon Radar », in *Radar Handbook*, 3^e Edition, ed. Merrill Skolnik (New York : McGraw-Hill, 2008), 201-20.83.
- Headrick et Thomason, « Applications of high-frequency radar », 1053.
- Voir note de bas de page 2.
- Spires, *North American Air/Aerospace Defense*, II-23.
- Richard F. McMullen, *The Aerospace Defense Command and Antibomber Defense*, 161-162. Le contexte n'indique pas clairement si McMullen rapporte les chiffres en dollars de 1966, qui auraient été utilisés au moment de la rédaction du plan, ou en dollars de 1973, utilisés au moment de la rédaction du plan par McMullen. Quoi qu'il en soit, selon le Bureau américain des statistiques du travail, cela représenterait plus de 6 milliards de dollars par an en dollars américains d'aujourd'hui; U.S Bureau of Labor Statistics, « CPI Inflation Calculator »; Tiré de https://www.bls.gov/data/inflation_calculator.htm, consulté le 12 avril 2023.
- CONAD Command History Division, *CONAD Command History*, 1968, 2.
- CONAD Command History Division, *CONAD Command History*, 1972, (Joint Staff Headquarters, CONAD, 1973), 38.
- Lois W. Campbell, Alan H. Katz et Delbert E. Patton, *Polar Fox II - Experimental Phase Semi-Annual Technical Report*, (Rome Air Development Center, RADC-TR-72-21, 1971).
- G. J. Grassman et J. Buchnu, *Analysis of Simultaneous Polar Fox II Backscatter and Ionospheric Sounding Data*, (Air Force Cambridge Research Laboratories, AFCRL-72-0432, 1972), 14.
- Contrairement aux essais Polar Fox II, il est difficile d'obtenir des détails non classifiés sur Polar Cap III. Les citations ci-dessus sont extraites de Spires, *North American Air/Aerospace Defense*, II-24 - II-25. Une description plus détaillée figure dans Aerospace Defence Command, *History of ADCOM, 1 July - 31 December 1975*, (Office of History, 1976), 20, tandis que Scotty Yool, « Polar Cap III : DRB studies over-the-horizon radar », *Canadian Forces Sentinel*, 91, 1973, 24-25 est un bref reportage photo.
- Spires, *North American Air/Aerospace Defense*, II-25 - II-26 et V-6 - V-7.
- Il s'agit de l'Accord de modernisation de la défense aérienne de l'Amérique du Nord, signé lors du « Sommet Shamrock » de mars 1985; voir, par exemple, Jockel, *Canada in NORAD*, 121.
- Headrick et Anderson, « HF Over-the-Horizon Radar », 2019. Voir également Riddolls, « A Canadian Perspective on High-Frequency Over-the-Horizon Radar », 18-20.
- Riddolls, *A Canadian Perspective on High-Frequency Over-the-Horizon Radar*, 8.
- Ibid.*, 19. Il convient de noter que la figure 7 est largement inspirée de la figure 6 de l'article de Riddolls (*Ibid.*, 19).
- Ryan Riddolls, « High-Latitude Application of Three-Dimensional Over-the-Horizon Radar », *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Vol. 32:12 (2017), 37.
- Headrick et Anderson, « HF Over-the-Horizon Radar », 2019.
- Headrick et Skolnik, « Over-the-Horizon Radar in the HF Band », 665.
- Le décalage Doppler des ondes est causé par la vitesse de l'onde ajoutée à la vitesse relative de l'entité qui transmet ou reflète l'onde. Il est connu sous la forme de la sirène plus aiguë d'une ambulance qui passe à une tonalité plus grave lorsqu'elle passe.
- Headrick et Anderson, « HF Over-the-Horizon Radar », 2017; Riddolls, « A Canadian Perspective on High-Frequency Over-the-Horizon Radar », 19.
- Thomason, « Development of Over-the-Horizon Radar in the United States », 600.
- Riddolls, « High-Latitude Application of Three-Dimensional Over-the-Horizon Radar », 36-37.
- Ryan Riddolls, « A Canadian Perspective on Arctic and Polar Over-the-Horizon Radar », *2022 IEEE Radar Conference* (2022), 1-2.
- Riddolls, *A Canadian Perspective on High-Frequency Over-the-Horizon Radar*, 19-20; Riddolls, « A Canadian Perspective on Arctic and Polar Over-the-Horizon Radar », 1-2.
- Ibid.* 2. Les figures 3 et 5 de cet article contiennent des images des réseaux.
- En particulier, peu de distinctions ont été faites entre les OTHR « arctiques » et « polaires »; les deux utilisent les idées de base discutées ici, mais il existe néanmoins des différences importantes. Voir *Ibid.* 1-6.
- Headrick et Merrill Skolnik, « Over-the-Horizon Radar in the HF Band », 667.
- Riddolls, « A Canadian Perspective on Arctic and Polar Over-the-Horizon Radar », 2.