

EDITORIAL

Depuis quelques années, une période d'abondance de données radar satellitaires, souvent libres d'accès, s'est substituée à la période antérieure où les images étaient rares et chères. L'utilisation de ces données dans différents domaines d'application est désormais vivement encouragée par les agences spatiales, ces dernières mettant gratuitement à disposition des logiciels de traitement et d'analyse d'images accompagnés de nombreux cours et tutoriaux. Au niveau européen, le programme Copernicus a mis en place des moyens importants pour diffuser et favoriser l'exploitation des images optiques et radar de la série Sentinel, et ce, en garantissant une continuité d'approvisionnement jusqu'à l'horizon 2030.

Cette abondance de données donne lieu à un foisonnement d'études, de rapports et de publications scientifiques où le rôle privilégié du système radar est souvent mis en avant, compte tenu de sa capacité à pouvoir opérer de nuit ou par ciel nuageux. C'est le cas, en particulier dans les zones polaires ou tropicales.

Malgré les résultats positifs obtenus par de nombreux chercheurs, la valorisation opérationnelle de leurs travaux peine à émerger dans de nombreux domaines, au moins pour les applications continentales. L'obtention de résultats robustes, moins sensibles aux conditions expérimentales n'est pas toujours au rendez-vous, même à la fin d'une étude menée pourtant avec beaucoup d'intelligence expérimentale et analytique.

Les enjeux liés à l'utilisation globale des images radar restent donc très importants ; citons comme exemples d'usage des images d'intensité, le suivi de l'occupation du sol, celui de la déforestation ou de l'impact potentiel des changements climatiques, l'érosion côtière, l'inventaire forestier, la gestion des parcelles agricoles, etc...

De leur côté, les produits interférométriques jouent un rôle unique. D'une part, ils concernent la mesure des altitudes et des déformations centimétriques de la surface terrestre, ce qui permet de s'intéresser aux risques géophysiques dans des conditions d'efficacité qui n'ont pas d'équivalent avec les autres données spatiales. D'autre part, l'obtention de résultats probants demande de mettre en place des protocoles expérimentaux plus raffinés que dans le cas des images d'intensité.

Ce numéro spécial de la RFPT fait suite au colloque Radar organisé par la SFPT sur le site l'ENSG à Champs-sur-Marne au printemps 2017. La plupart des articles présentés dans la Revue sont issus du colloque ou de la formation associée.

Nous souhaitons couvrir dans ce numéro les grandes lignes relatives aux bases et applications de la télédétection radar continentale. Ce regard est porté plus de 40 ans après le lancement du premier satellite radar SEASAT (cf le premier article de ce numéro) et nous pouvons ainsi mesurer le chemin parcouru pendant une durée qui correspond tout juste à celle d'une carrière professionnelle.

Sans chercher à être exhaustif et sans multiplier les études de cas, nous avons retenu une organisation en 3 parties :

1. les articles présentant l'imagerie radar de manière générale,
2. des applications se nourrissant d'images d'intensité
3. des applications concernant la mesure des déplacements du sol, et notamment par interférométrie en utilisant pour cela nécessairement les données complexes.

Passons rapidement en revue chacune des contributions.

Les articles généraux :

1. Le premier article de J.-M. Nicolas et F. Tupin présente l'historique depuis 4 décennies des systèmes imageurs radar au travers des évolutions technologiques qui ont permis l'amélioration de la qualité des images et le développement des approches polarimétriques et interférométriques. Une attention particulière est apportée aux traitements numériques étroitement liés à l'originalité des images (par exemple, format complexe et distributions statistiques spécifiques).

2. Le papier qui suit de J.-P. Rudant et P.-L. Frison s'intéresse à la calibration, c'est à dire à la transformation des images d'intensité en coefficients de rétrodiffusion habituellement utilisés pour caractériser la surface terrestre et dont les valeurs se retrouvent dans les ouvrages scientifiques. Différents cas, prenant ou non en compte les effets géométriques et radiométriques du relief, sont discutés à cette occasion.

3. Cette contribution est suivie d'une « lettre » des mêmes auteurs de format plus léger, consacrée, d'une part à l'analyse des relations formelles existant entre coefficients de rétrodiffusion radar et coefficients de réflectance en optique (réflectance, luminance), et d'autre part à l'analyse comparée de la manière dont les images optiques ou radar reflètent respectivement des coefficients destinés à caractériser la surface (état superficiel et relief).

4. Le papier suivant de P.-L. Frison, C. Lardeux, B. Fruneau et J.-P. Rudant est consacré aux propriétés et applications générales de la technique polarimétrique. Divers exemples permettent de situer les avantages comparés des données

partiellement ou totalement polarimétriques, comportant ou non les informations de phase différentielle. Un intérêt particulier est porté à la végétation dont la réponse sur les images radar dépend fortement de la structure et de la densité des couverts.

5. L'interférométrie radar est le sujet de l'article suivant d'E. Simonetto, B. Fruneau et D. Raucoules. Cette technique exploite et nécessite impérativement les informations de phase, alors qu'elles sont facultatives pour la polarimétrie. Après quelques généralités sur son principe de fonctionnement, son intérêt comme technique géodésique (mesure des altitudes ou des déplacements du sol), mais aussi les contraintes d'applicabilité, et ce malgré de nombreuses avancées prometteuses évoquées dans l'article, sont ici présentés.

Les applications des « images d'intensité » :

6. Le premier papier de L. Polidori nous propose un historique des applications de cartographie 2D et 3D radar en Amazonie. C'est une véritable aventure qui débuta par le projet RADAM au Brésil il y a un demi-siècle. Il s'agissait alors d'une couverture globale d'images aéroportées. Depuis lors, l'ensemble de l'Amazonie est apparu comme un immense laboratoire où presque tous les types de données aérospatiales radar ont donné lieu à des expérimentations, y compris par interférométrie, ce que l'article nous relate en détail.

7. L'article suivant de C. Lardeux, A. Kemavo, M. Rageade, M. Rahm, P.-L. Frison et J.-P. Rudant propose de suivre la dynamique d'occupation du sol et de la déforestation sur deux zones test situées en contexte tropical, l'une en Guyane, l'autre au Togo. Dans les deux cas, la synergie des images optique et radar est soulignée et la diffusion d'un logiciel open source s'appuyant sur QGIS et OTB est proposée aux utilisateurs intéressés par la méthode et désireux de traiter eux-mêmes leurs propres applications.

8. La troisième contribution (au format lettre) de J. Inglada est consacrée au suivi de parcelles agricoles dans une région du Sud-Ouest de la France. Les performances obtenues grâce à des séries temporelles d'images optiques, de qualité déjà élevée, sont rendues plus robustes par intégration d'images radar. Celles-ci viennent combler le manque d'informations lorsque l'efficacité des images optiques est fortement réduite pour des raisons climatiques.

Les applications de l'imagerie radar pour la mesure des déplacements du sol :

9. Le premier article de D. Raucoules, E. Simonetto et B. Fruneau, donne un aperçu de l'utilisation de l'interférométrie radar pour la détection, la cartographie et la surveillance de phénomènes de déplacements du sol liés à diverses origines anthropiques : travaux souterrains, extraction/injection de fluides, activités minières. Plusieurs exemples, allant de l'échelle d'un bâtiment à plusieurs dizaines de kilomètres carrés, viennent en montrer l'intérêt mais certaines limites sont aussi évoquées, notamment dues au couvert végétal et à l'échantillonnage temporel des images.

10. La seconde contribution de J.-L. Froger, V. Pinel, G. Bato, M. Tridon, D. Smittarello, J.M. Prival, A. Hrysiewicz, V. Cayol et Y. Guehenneux, met en évidence l'apport de l'imagerie radar en volcanologie, à travers de l'exemple du Piton de la Fournaise. Les auteurs montrent que l'interférométrie, grâce aux mesures des déplacements, de la topographie et à la cartographie des changements permise par la cohérence interférométrique, fournit une quantification des volumes de magma en profondeur et émis en surface, utile pour la compréhension fine des mécanismes sous-jacents.

11. Le dernier article, de R. Fallourd, A. Dehecq, M. Jauvin, Y. Yan, G. Vasile, M. Gay, E. Trouvé, J.M. Nicolas, expose comment mesurer des champs de vitesse d'écoulement de surface et la topographie par interférométrie et corrélation d'images radar, pour l'observation de glaciers de montagne, ici avec l'exemple de glaciers alpins. Les auteurs évoquent les difficultés et solutions spécifiques à mettre en place pour ce type de terrain à forte variabilité spatiale et temporelle, en particulier pour le filtrage du bruit et le déroulement de phase en interférométrie radar, ainsi que les nouvelles perspectives offertes par les données Sentinel 1.

Quels enseignements tirer de ces diverses contributions ?

Les applications « Images d'intensité »

L'intérêt de pouvoir disposer de séries temporelles importantes est souligné pour le suivi des états de surface ; ainsi, l'amélioration de la résolution spatiale effective (donc de la lisibilité des images) et la détection de changements à différentes échelles temporelles sont des sujets très actuels. Grâce aux images Sentinel, des séries de plusieurs centaines d'images sur un même site ne sont pas rares ; par exemple sur l'Europe, le flux d'une soixantaine d'images par an. Sachant que l'extension de la couverture spatiale par assemblage de mosaïques est également possible, cela ouvre vers des chantiers gigantesques, non envisageables dans le passé. La gratuité des images constitue bien sûr un facteur positif décisif pour ce genre d'application (merci au programme Copernicus et à l'ESA).

Pouvoir récupérer toutes ces données nécessite une liaison internet de débit suffisant et des moyens informatiques performants. Une image Sentinel 1 pèse entre 2 et 5 giga octets selon le format. Le logiciel d'accompagnement SNAP est très gourmand en place mémoire et nécessite une grande puissance de calcul.

L'effet pervers de cette largesse de diffusion par le programme Copernicus est que plus de 90% (valeur à l'automne 2017) des images sont captées par les GAFA et que certains destinataires, à priori intéressés en premier lieu par cette manne gratuite, n'y ont pas accès. C'est le cas dans de nombreuses universités de pays du Sud. Sur ce point, la situation évolue positivement mais lentement.

L'utilisation en synergie des images optiques et radar semble être la règle dès l'instant que l'application concerne la surface continentale. Retenons que la richesse apportée par cet usage conjoint est aussi élevée que l'est pour nous l'association de deux de nos sens, vue et toucher. D'un côté, on apprécie les *signatures spectrales*, étendues du visible aux invisibles proche et moyen infrarouge, sorte de « vision augmentée ». De l'autre, on perçoit un certain nombre de propriétés physiques et géométriques, humidité, rugosité, densité et hétérogénéité des matériaux, déplacements minimes, auxquelles le radar s'avère souvent nettement plus sensible que l'optique. Cette sorte de « sens du toucher renforcé », propre aux images radar, les rend pleinement complémentaires aux images optiques.

Au travers des deux contributions portant sur les espaces agricoles et forestiers qui exploitent cette synergie, le souci de parvenir à une application opérationnelle est tout à fait perceptible. Cette préoccupation n'est pas nouvelle mais imprègne plus fortement les travaux radar depuis que les images Sentinel-1 et 2 abondent. Il est certain que le ratio (images radar/ images optiques) est nettement moins élevé pour le sujet sur les prévisions agricoles que pour le sujet sur la déforestation, mais ces deux exemples démontrent que chaque application doit savoir adapter le mode de fusion selon les caractéristiques du milieu et les contraintes calendaires et saisonnières qui lui sont associées.

Cette préoccupation de hausser le caractère opérationnel des applications traitées grâce aux images est devenue commune et gouverne en partie l'investissement dans les programmes spatiaux.

Les applications « produits interférométriques »

Les différents travaux en interférométrie radar confirment clairement l'intérêt de cette technique, que ce soit pour mesurer la topographie ou calculer des déplacements du sol (déplacement entre 2 dates, vitesses moyennes et séries temporelles des déplacements cumulés sur la période couverte par les images radar) sur de grande étendue et à des densités inégales par toute autre méthode géodésique. L'interférométrie radar permet aussi d'accéder aux mesures du passé grâce aux archives d'images radar. L'échantillonnage temporel reste à ce jour la principale limitation pour les applications opérationnelles de surveillance des édifices ou de sites soumis à des risques. La disponibilité récente des données Sentinel 1 de l'UE (Union Européenne) et de l'ESA (Agence Spatiale Européenne) apporte ainsi de nouvelles perspectives avec une période de revisite des satellites de seulement quelques jours.

La problématique est différente selon que l'on s'intéresse à un lieu occupé par des objets anthropiques ou au contraire à des sites naturels et parfois l'interférométrie radar montre des limites d'utilisation. Les nombreuses avancées sur le traitement du signal interférométrique permettent déjà de répondre à certaines limitations d'applicabilité de la méthode. De plus, l'interférométrie radar mesure les déplacements dans la ligne de visée du capteur, mais le mouvement en 3D est parfois accessible en couplant des images acquises depuis des orbites ascendantes et descendantes et des méthodes de mesure du mouvement horizontal.

Les produits interférométriques, calculés sur une même période, ne sont pas reproductibles si l'on modifie le capteur radar et les algorithmes mis en œuvre, puisque d'une part les objets ne sont pas vus identiquement et d'autre part les approches inhérentes aux chaînes de traitement sont différentes. Ceci entraîne un besoin d'expertise sur l'utilisation de l'interférométrie radar et l'interprétation des mesures obtenues. Mais cela montre aussi la nécessité pour la communauté de construire des standards sur les produits fournis, des normes de validation des mesures interférométriques, des protocoles d'étalonnage aussi bien des méthodes mises en œuvre par les utilisateurs que des algorithmes.

C'est un véritable défi du fait de la diversité des cas traités. Il faut toutefois considérer que l'interférométrie radar est une technique très récente (fin des années 1980) comparée à d'autres comme la photogrammétrie. Elle connaît un essor rapide et sans interruption depuis la mission satellite ERS de l'ESA. Ses avancées se nourrissent de la variété des capteurs et des modes d'acquisition originaux ; les agences spatiales doivent elles-mêmes aussi répondre à la demande des chercheurs débordant d'idées pour contourner les limites existantes. Grâce aux nombreux travaux de recherche en interférométrie radar, passés et actuels, l'interférométrie radar est toujours en pleine émergence.

Pour faciliter l'utilisation de l'interférométrie radar et la diffusion des produits interférométriques, des services web de traitement des images et /ou de téléchargement des produits se mettent en place. Citons par exemple la plateforme G-POD proposée par l'ESA. Dans cette plateforme, l'utilisateur choisit les données qu'il souhaite exploiter, les outils de traitement à lancer et les produits à générer sur son site d'étude. Un tel service apporte la solution à l'exploitation des jeux de données très volumineux, impossibles à stocker ou à traiter sans un ordinateur très performant. Ceci suppose cependant que la plateforme ait l'accès aux données et que les chaînes de traitement y soient implémentées. Le service web peut aussi être envisagé uniquement pour la diffusion des produits interférométriques. L'observation de points avec leur position 3D et séries temporelles des déplacements en surface à l'échelle d'un pays tout entier est possible techniquement ; l'impact sociétal d'un tel service ne peut cependant pas être négligé.

En conclusion, consacrons simplement plusieurs lignes à ce que devrait nous réserver le proche avenir, comme nouveautés en termes de mesures et de modes de traitement.

L'avenir des mesures spatiales en bande P

Le satellite BIOMASS dont le lancement est prévu en 2020, fonctionnera en bande P ($\lambda=69$ cm), très pénétrante et ses mesures concerneront donc la gamme complète de biomasse aérienne. Pleinement polarimétrique, bénéficiant ainsi des intensités HH, VV, et HV (HV polarisation réputée pour sa sensibilité particulière au couvert végétal) et des phases différentielles, il est prévu que ce capteur, au prix de traitements et modélisations sophistiqués, de types TOMOSAR et POLINSAR, fournisse des évaluations de biomasse aérienne, hauteur et structure des couverts forestiers (précision annoncée 20%). Avec une résolution au sol de l'ordre de 150 m, les résultats concerneront de vastes surfaces et ne seront pas adaptés aux études détaillées. Au départ, il semble certain que les produits finaux ne pourront être réalisés que par quelques laboratoires et organismes spécialisés. Cette situation risque de conduire à un moindre investissement de l'utilisateur standard (ou normal) qui trouvera difficilement sa place dans le processus (sauf peut-être au travers de collaborations sur des projets importants pour effectuer des contrôles in-situ et des calibrations sur ses zones d'intérêt). Effectivement le sujet sous-jacent portant sur les stocks de carbone et leurs évolutions, qui s'avère grand public au niveau médiatique, l'est beaucoup moins au niveau des utilisateurs d'images de télédétection capables d'affronter des traitements à ce niveau de difficulté. Seules, des institutions importantes pourront être efficaces en face des données brutes BIOMASS, à la différence, par exemple, des applications cartographiques menées avec Sentinel 1 qui ont fait grimper significativement le nombre d'utilisateurs.

Quelles évolutions prévisibles pour le traitement des données dans un contexte *Big-data*

1- La complexité des approches utilisant des séries d'images multi-sources optique et/ou radar couplées à des mesures de paramètres « terrain » de natures diverses nous plonge déjà et va nous plonger encore plus dans l'univers du *Big Data*.

Faisons un calcul d'ordre de grandeur du nombre de valeurs à gérer dans le cas où une technique d'apprentissage automatique est mise en œuvre sur une série temporelle d'images durant une année. Pour fixer les idées, prenons l'exemple d'une expérimentation menée actuellement au laboratoire LaSTIG où l'objectif est de suivre l'état cultural sur un ensemble de 200000 parcelles dans le centre de la France. Sur une année, une centaine d'images radar Sentinel 1 sont acquises (orbites montantes et descendantes), chaque parcelle correspond en moyenne à 1000 pixels (de l'ordre de $320m \times 330m$).

Nous avons donc 200000×1000 pixels étudiés. Dans une image radar, envisageons 4 descripteurs pour chaque pixel (intensités VV et HV, rapport VV/HV ; cohérence avec la date antérieure la plus voisine) ; cela donne, par date, 200000000×4 données en entrée pour les pixels, c'est-à-dire 80×10^9 données pour la série d'images, dont le poids global est de 160 Go si l'on suppose que chaque valeur est codée sur 2 octets (entier court).

Le nombre d'états culturaux (classes) envisagés est de 30. Pour toute méthode d'apprentissage, il est nécessaire de fournir un label sur un pourcentage significatif des parcelles étudiés, disons 10%, c'est-à-dire ici sur 20000 parcelles.

Qu'obtient-on ? Des dizaines de milliers ou des millions d'objets à classer, des millions de labels, des millions de paramètres décrivant les images, c'est-à-dire des dizaines de millions de variables à manipuler, gérer pour en déduire une information cohérente et établir des classes de manière efficace.

Comment faire le tri au travers de cette nuée de variables et d'axes associés ?

L'espace de décision voit sa dimension croître de manière explosive et la photo interprétation des images, présente de manière dominante au début de l'ère spatiale, n'intervient plus que de manière marginale dans le traitement et l'interprétation des données. La voie royale émergente d'analyse et d'apprentissage, l'apprentissage dit profond (*deep learning*) basé sur des réseaux de neurones multicouches, intervient aujourd'hui de manière dominante avec efficacité, mais la logique du cheminement entre données et résultats recèle des zones d'incompréhension même pour les spécialistes du domaine. On est loin des lois quantitatives claires et simples rencontrées fréquemment en physique, d'autant plus que le fonctionnement interne du réseau va introduire quelques centaines de milliers de paramètres supplémentaires.

Tout cela est entièrement nouveau.

Le cocktail très efficace de connaissances disciplinaires (mathématiques avec ses structures algébriques et ses espaces plus ou moins convexes, statistiques, probabilités, optimisation, théorie des ondelettes, physique) et d'algorithmes puissants, fait que l'on peut aujourd'hui espérer obtenir plus de résultats en confiant à la machine le soin de trouver le bon chemin dans le labyrinthe joignant les millions de données en entrée et la nomenclature de quelques dizaines de classes qui intéressent l'utilisateur en fonction de ses objectifs

Celui-ci se trouve alors en situation d'obtenir plus de résultats, souvent de meilleure qualité qu'avec les pratiques antérieures, mais sans comprendre vraiment le modèle généré par l'algorithme. Cette situation s'apparente en quelque sorte à un slogan de campagne électorale « travailler moins pour gagner plus ». Nul doute que le succès sera au rendez-

vous pour tous ceux qui disposent d'une base de données suffisante (observations et annotations) leur permettant de choisir cette voie d'analyse.

Que reste-t-il comme espace de manœuvre à l'utilisateur de bonne volonté mais « normal » qui ne dispose de données images et de contrôles de terrain qu'en volume raisonnable ? Il lui reste les procédures d'analyse habituelles appuyées par la photo-interprétation, segmentation d'images manuelle ou numérique, classification selon des méthodes usuelles et aujourd'hui correctement maîtrisées. Ce sera le cas en particulier pour bon nombre d'applications écologiques pour lesquelles le nombre de données de référence et d'apprentissage restera toujours modeste.

Nul doute que faire un point dans 3 ou 4 ans, sur ces deux sujets (BIOMASS et apprentissage profond, voire aussi sur leur combinaison) sera l'occasion de mettre en chantier deux autres numéros spéciaux de la RFPT. Dans l'immédiat, et pour rester dans le champ couvert par ce numéro spécial où nous nous sommes intéressés à l'influence des effets de pente sur les mesures d'intensité dans les images radar, il serait intéressant de confronter dans des zones de relief modéré, les résultats obtenus par des moyens d'interprétation classiques avec ce à quoi nous conduiraient les réseaux de neurones en termes de compréhension des images.

2- Autre source prévisible d'évolution importante dans le contexte *Big Data*, l'apparition des plateformes de traitement distantes. Revenons sur ce sujet des Services déjà évoqués rapidement à l'occasion de la discussion sur les applications des produits interférométriques.

La mise en place de centres de traitements distants proposant aux utilisateurs de choisir leurs images en vue d'effectuer des traitements standards ou personnalisés, apparaît comme une évolution positive. Le téléchargement préalable d'images très lourdes ne sera plus nécessaire car les traitements pourront être effectués à la volée. Cette procédure a pour objectif global de valoriser les données spatiales et mesures de terrain associées en favorisant au passage l'émergence de nouveaux traitements auxquels pourront être attachés des services opérationnels. Les agences spatiales et Google sont très actifs en ce sens ; citons par exemple, les projets FORMATER pour le CNES et ENGINE pour Google. Certaines difficultés devront être levées pour que l'usage de tels systèmes se répandent au-delà des équipes déjà très expérimentées capables de développer leurs propres algorithmes. Ces équipes seront certainement les premières à profiter avec satisfaction de ces offres de puissance de calcul et de capacité de stockage. Les difficultés concernent les utilisateurs « normaux » évoqués précédemment, semi experts ou non experts en traitement d'images de télédétection, mais intéressés par les produits sur étagère touchant à leurs domaines thématiques. Comment faire pour que ces produits soient adoptés sans trop de réserves ? D'autant que la concurrence aidant, plusieurs variantes d'algorithmes pourront être proposées en parallèle et que, faute de compréhension en profondeur sur le mode d'élaboration des produits, la confiance ne sera pas évidente chez les usagers. Une priorité sera d'encourager l'accès aux nouvelles plateformes des « non-experts » (les plus difficiles à convaincre) en expliquant en détail comment les critères de validation ont été établis pour les produits en question.

C'est dire l'importance de la tâche à venir et les perspectives immenses auxquelles devront être associés les membres de notre communauté. Profitons de cette occasion pour mettre en synergie toutes nos compétences ; compétences qui couvrent quasiment tous les domaines de la télédétection radar, allant de la recherche aux applications opérationnelles.

Jean-Paul Rudant et Elisabeth Simonetto
Coéditeurs du numéro Spécial Radar