



Des miliciens canadiens et des soldats britanniques repoussent l'assaut des troupes américaines sur Sault-au-Matelot, à Québec, le 31 décembre 1775. Une toile de Charles William Jefferys (1869-1951).

VOTRE MONDE EST-IL COMPLEXE? UN APERÇU DE LA SCIENCE DE LA COM- PLEXITÉ ET DE SON POTENTIEL D'APPLICATION MILITAIRE

par Stéphane Blouin

Introduction

Le 31 décembre 1775, le General Richard Montgomery, un officier de l'Armée continentale américaine, prend la décision fatale pour lui-même et lourde de conséquences pour son pays de mener personnellement l'assaut à travers la brèche dans une barricade érigée dans la ville de Québec. Cette décision a en effet permis aux Britanniques de rester présents en Amérique du Nord. Si Montgomery avait plutôt utilisé ses troupes comme bouclier, il aurait peut-être survécu et pris la ville de Québec, qui ferait aujourd'hui partie des États-Unis. Cet exemple illustre comment une simple décision ou un seul événement peut avoir un impact décisif sur l'issue des guerres ou des batailles complexes.

Depuis quelques décennies, un nombre impressionnant d'écrits portant sur des sujets comme les « systèmes complexes » et la « complexité » ont été publiés et repris dans la littérature des domaines de la gestion, de l'économie, de la biologie et de la

politique. Malgré l'ampleur de ce corpus, les notions associées à la complexité restent difficiles à comprendre, en partie en raison du manque de clarté des définitions, des concepts et des principes qu'elle sous-tend. Cet article vise à présenter une introduction au concept de la complexité, aux outils connexes et à l'impact potentiel sur les opérations militaires.

Il va de soi qu'il est compliqué d'expliquer la complexité. Le domaine de la recherche en matière de complexité n'est pas

Stéphane Blouin, Ph. D., P.Eng, est un scientifique à l'emploi de Recherche et développement pour la défense Canada. Il est également professeur auxiliaire à l'Université Dalhousie, à Halifax. Il est titulaire de diplômes en génie mécanique, en génie électrique et en génie chimique. Il a occupé divers postes en recherche et développement au Canada, en France et aux États-Unis dans les domaines de l'application de processus à grande échelle, des lignes de montage automatisées, de la robotique et des réseaux. Il s'intéresse aux recherches portant sur la surveillance en temps réel, le contrôle et l'optimisation de systèmes de phénomènes non linéaires, indépendants ou à dynamique hybride.

encore arrivé à maturité et s'apparente plus à l'étude d'un vague réseau d'idées interreliées et interdépendantes.^{1, 2} La majorité des concepts de la complexité sont liés à la façon dont la vie, telle que décrite dans les sciences sociales, la biologie et la physique, surgit et évolue. Le terme « système complexe » renvoie à un assemblage de réalités qui interagissent selon des règles et se manifestent de façons nouvelles en réponse à l'adaptation. Les marchés de valeurs mobilières, les écosystèmes et les systèmes immunitaires constituent des exemples de systèmes complexes dont on entend habituellement parler.

Procter & Gamble (P&G), Southwest Airlines et d'autres entreprises ont déjà tiré des bénéfices de l'utilisation des concepts de la complexité.^{3, 4} P&G a optimisé la circulation de ses matières premières pour plusieurs de ses produits manufacturés en adoptant, pour sa chaîne d'approvisionnement et dans ses logiciels, des règles de communication semblables à celles qu'utilisent les colonies de fourmis. Aux fins de l'analogie, les fourmis déterminent en effet collectivement quel est le chemin nouveau et efficace à suivre lorsque l'itinéraire emprunté jusque-là est bloqué. Par l'utilisation d'une telle méthode, P&G est en mesure de réduire les coûts et le temps d'acheminement de moitié. Pour ce qui est de Southwest Airlines, des modèles informatisés ont démontré que le transfert de colis aux vols les plus directs provoque des périodes d'entreposage et des manipulations inutiles. En acceptant d'utiliser un plus grand nombre d'itinéraires moins directs, le transporteur a réduit son taux de transfert des colis de 70 pour 100, ce qui engendre des économies de millions de dollars.

Pourquoi une organisation militaire devrait-elle tenir compte de la complexité? Pour de nombreuses raisons, il appert que :

- l'approche newtonienne⁵ classique, qui préconise un fonctionnement semblable à celui d'une machine, est souvent inadéquate;
- l'ampleur potentielle des applications militaires est considérable;
- la complexité offre souvent des réponses et des introspections auxquelles ne peuvent mener aucun autre modèle théorique existant⁶, elle peut donc accorder une certaine supériorité;

- les organisations militaires ainsi que leurs opérations, par exemple celles qu'elles mènent pendant les guerres et les activités de stabilisation, sont des systèmes complexes.

Les exemples tirés de nombreuses disciplines et leurs parallèles avec les opérations militaires sont ici utilisés pour présenter les idées majeures et les principaux concepts. Étant donné l'ampleur du sujet, il n'est pas traité de façon exhaustive et les références aux publications originales sont mentionnées à l'intention des lecteurs intéressés.

Définition des systèmes complexes

Les systèmes complexes répondent à tous les critères suivants :

- ils sont composés d'une variété d'éléments tels que des équipements informatiques, des logiciels et des gens;
- les interactions et leurs composantes obéissent à des règles;
- ils sont « ouverts », en ce qu'ils échangent énergie, matière et information avec leur entourage;
- un comportement collectif en émerge;
- leur tout est plus grand que la somme de leurs parties;
- ils sont capables d'adaptation et d'auto-organisation.

La caractéristique distinctive des systèmes complexes est leur émergence, leur comportement global résultant des interactions entre leurs composantes.

Origines du concept de la complexité

Comment vaincre un groupe décentralisé de terroristes? Au combat, comment obtenir l'avantage sur l'ennemi? Comment stabiliser une région et établir la confiance entre ses résidents? Les réponses à ces difficiles questions ont plus en commun avec un organisme vivant qu'avec le mécanisme d'une horloge. De façon similaire, le concept de la complexité est influencé par des sujets qui touchent l'apparition de la vie et la façon dont elle évolue pour devenir des sociétés et des systèmes naturels.

Les principales forces motrices de la recherche sur les systèmes complexes émanent de découvertes faites dans les domaines de la biologie et de la technologie informatique en rapide évolution et du fait que souvent les réponses et introspections offertes par la complexité ne peuvent être obtenues d'aucune autre façon. Les premiers travaux effectués dans de nombreuses disciplines ont permis d'établir des principes fondamentaux et des propriétés universelles du domaine de connaissance de la complexité tel que nous le connaissons aujourd'hui.

L'évolution de la recherche en matière de complexité est le mieux illustrée par une liste de quelques résultats clés; une perspective historique plus complète de cette évolution se trouve dans la documentation sur le sujet⁷. À



Southwest Airlines.

Southwest Airlines, premier transporteur à mettre en service le nouvel appareil 737 MAX du constructeur Boeing, le 13 décembre 2011.



NOAA.

Image satellite de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de l'ouragan Katrina, le 24 août 2005.

la fin des années 1950, le pionnier en matière de cybernétique, W.R. Ashby⁸, a formulé une loi selon laquelle « le groupe des possibilités » d'un système devrait au minimum correspondre à l'étendue des difficultés à surmonter⁹. Par exemple, en comparaison avec la guerre traditionnelle, la clé du succès dans les conflits armés complexes d'aujourd'hui est la capacité de petites unités d'agir indépendamment avec relativement peu de coordination, ce qui permet d'accroître le volume de leur « le groupe des possibilités ». Cette stratégie se trouve tout à fait à l'opposé de l'approche du déploiement des forces à grande échelle destinées à opérer ensemble durant la Grande Guerre et la Seconde guerre mondiale.

En 1963, le mathématicien et météorologue de renommée mondiale Edward Lorenz¹⁰ publiait les résultats de sa simulation par ordinateur sur « L'attracteur étrange ».

L'attracteur étrange est un système d'une extrême sensibilité aux conditions initiales et il n'adopte jamais un état prévisible. Lorenz a démontré que la météo constitue un système et qu'elle ne peut être prévisible à 100 pour 100. Il a présenté sa métaphore de l'« effet papillon » en 1972 lorsqu'il a donné une présentation intitulée « Prévisibilité : le battement d'aile d'un papillon au Brésil peut-il provoquer une tornade au Texas? » L'effet papillon peut similairement être appliqué à l'état de stabilité du monde en ce que de petits événements régionaux peuvent avoir d'importances incidences au niveau international. L'exemple classique dans ce domaine est l'éclatement de la Première Guerre mondiale, en juin 1914, suite à l'assassinat, à Sarajevo¹¹, de l'archiduc Francis Ferdinand d'Autriche et de sa femme.

En 1967, le psychosociologue Stanley Milgram a mené une expérience¹² pour modéliser la connexité dans les sociétés humaines. Son expérience a permis d'élaborer la « théorie des six degrés de séparation », aussi appelée « l'étude du petit monde », selon laquelle deux personnes peuvent être reliées ensemble par l'entremise d'au plus cinq autres personnes qui se

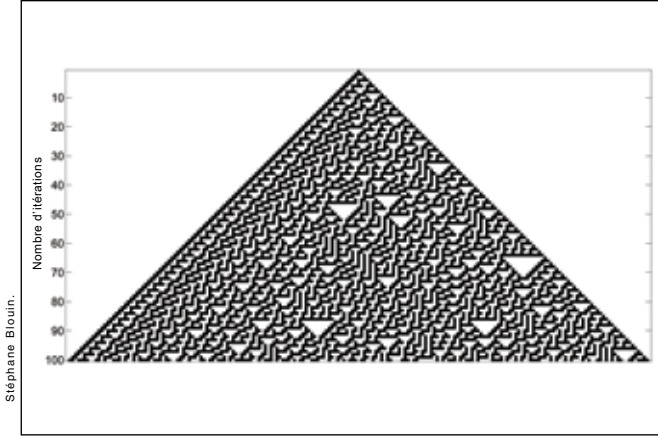
connaissent¹³. La connexité a un important impact au moment où une force militaire stabilise une région en utilisant les réseaux sociaux pour développer la confiance entre ses résidents¹⁴.

En 1983, Stephen Wolfram¹⁵, principal réalisateur du logiciel Wolfram *Mathematica*^{MD}, a effectué une simulation dont les résultats démontrent que des règles rudimentaires peuvent



Gianni Dagli Orti/The Art Archive at Art Resource, NY.

Le 28 juin 1914, Gavrilo Princip assassine l'archiduc Franz Ferdinand d'Autriche et son épouse, Sophie, à Sarajevo en Bosnie. Une toile d'Achille Beltrame.



Représentation de la simulation de Wolfram.

engendrer des formes naturelles complexes. De fait, l'algorithme de Wolfram crée une forme qui ressemble à la coquille d'un escargot. Des formes beaucoup plus complexes qui se trouvent dans la nature peuvent également être générées par des règles rudimentaires¹⁶. Les résultats de la simulation d'oiseaux volant en formation¹⁷ publiés par Reynolds en 1987 constituent un autre exemple de règles rudimentaires permettant de modéliser des comportements naturels complexes. Expert de la simulation de la vie et de l'infographie, C.W. Reynolds a démontré comment des systèmes gouvernés par trois règles rudimentaires peuvent reproduire le comportement efficace, bien que très adaptable, d'oiseaux qui volent en formation. Des instructions similaires aux règles représentant le modèle mathématique de volées d'oiseaux en formation ont été codées dans le programme de vol de véhicules aériens sans pilote pour garantir qu'ils volent en formation tout en évitant les collisions¹⁸.

Les concepts d'émergence, du tout plus grand que la somme de ses parties et de l'adaptation sont bien illustrés par les oiseaux volant en formation. La forme en « V » naturellement adoptée par les volées d'oiseaux migrateurs est un exemple classique du concept d'émergence. Les concepts d'émergence et du tout plus grand que la somme de ses parties sont étroitement liés dans le contexte de l'ensemble du système formé par des oiseaux volant en formation; il est impossible de comprendre ce système en ne maîtrisant que la connaissance de chacune de ses parties prises en isolation, c.-à-d. chaque oiseau. Dans ce système, l'adaptation est illustrée par le remplacement de l'oiseau qui occupe la tête de la formation par n'importe quel autre oiseau de la volée. Certains groupes terroristes ont adopté une structure similaire de groupes locaux informels dans lesquels n'importe quel membre du groupe peut assumer le rôle de leader¹⁹. De même, l'organisation de la société d'une colonie de fourmis ne résulte pas de l'imposition d'un diktat de sa reine, mais



L'algorithme de Wolfram crée une forme qui ressemble à la coquille d'un escargot.

bien d'interactions locales entre des milliers de fourmis ouvrières²⁰. L'ordre règne malgré l'absence d'une autorité centrale en raison des interactions entre les éléments d'une société gouvernée par la coopération et la compétition.

Il est étonnant de constater le nombre de résultats différents que peut engendrer un petit ensemble de règles d'interaction appliqué à un système complexe. Dans les exemples dont il a déjà été fait mention, l'algorithme de Wolfram ne comprend que huit règles et la simulation de vol en formation de Reynolds n'en compte que trois. Un petit nombre de règles peut mener à un très grand nombre de résultats. Par exemple, le jeu d'échecs ne comporte que quelques douzaines de règles, mais bien qu'on s'y adonne depuis des centaines d'années, nous continuons à découvrir de nouvelles stratégies de jeu. Des règles défailtantes portant sur les interactions locales entre les composantes peuvent avoir des conséquences regrettables au niveau mondial. Prenons par exemple la panne de courant du 14 août 2003, à l'occasion de laquelle 20 pour 100 du réseau de distribution de l'Amérique du Nord est tombé en panne. Cette panne a été provoquée par de nombreuses interactions locales et interdépendantes les unes des autres.



Oiseaux volant en formation comme dans la simulation de C.W. Reynolds.

http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:C3%B4ne_textile11.png

Vince Mo/Flicker.

Photo 500px.com par Annette Gerard.



des résultats inattendus et une capacité de prédiction à court de la perfection. Comme pionnier des systèmes complexes et de la science non linéaire, J.H. Holland a déclaré « ...qu'avec un plan de recherche soigneusement établi, dans des conditions contrôlées et avec des agents sélectionnés, les systèmes complexes font quand même à leur tête²² [TCO]. »

Un des plus grands défis que doit surmonter le praticien du concept de la complexité est la grande dépendance du résultat au contexte et aux antécédents historiques. Pour ce qui est sa mise en application dans le contexte militaire, c'est la difficulté de s'en remettre à des systèmes qui ne proposent aucune mesure quantifiable d'efficacité qui pose problème²³. La complexité, dans son sens le plus strict, est également difficile à utiliser parce qu'elle n'indique pas toujours ce que les gens doivent faire différemment dans des contextes particuliers²⁴. Ces deux dernières difficultés peuvent cependant être surmontées en testant différents scénarios de nombreuses fois et en comparant les résultats ainsi obtenus.

Un des outils les plus utilisés pour étudier les systèmes complexes est leur modélisation au moyen d'un ordinateur. Les obstacles les plus importants que présentent les modèles informatiques sont qu'ils peuvent manquer de rigueur scientifique, qu'il n'existe pas de consensus au sujet des différents types de modèle et que leur validité peut être mise en doute. Diane Hendrick, un membre actif de l'organisme Peace & Collaborative Development Network, a soulevé une intéressante question : « Dans quelle mesure un modèle peut-il être utile et fiable si ses propriétés d'émergence sont limitées par les interprétations des concepteurs du modèle²⁵ [TCO]? » La calibration de ces modèles informatiques pour qu'ils présentent d'étroites corrélations avec les systèmes réels constitue une autre difficulté. Certains critiques soutiennent que la modélisation de la complexité ne donne que des résultats discutables et limités pour ce qui est de leur applicabilité.

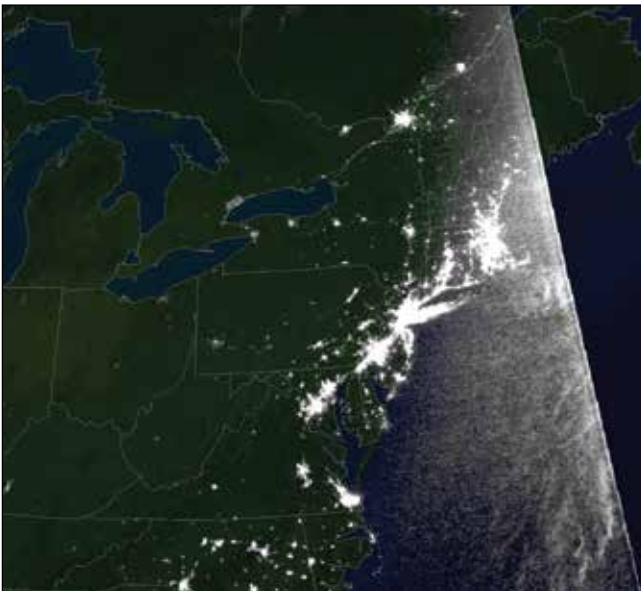
Approche de la complexité

Avantages et inconvénients

La complexité propose des voies novatrices pour aborder les problèmes et pose de nouvelles questions. Certains auteurs sont d'avis que la complexité « ...permet de comprendre de vieux concepts de façon différente et d'injecter de la nouveauté dans les généralisations de certains types de phénomènes et qu'elle est porteuse de concepts qui lui sont propres²¹ [TCO]. » Malgré les possibilités limitées en matière de prévisibilité, il est possible de tirer des conclusions valables de l'étude de systèmes complexes. De même, bien que la météo ne soit pas complètement prévisible, la sphère de ses conditions possibles est déterminée par les météorologues.

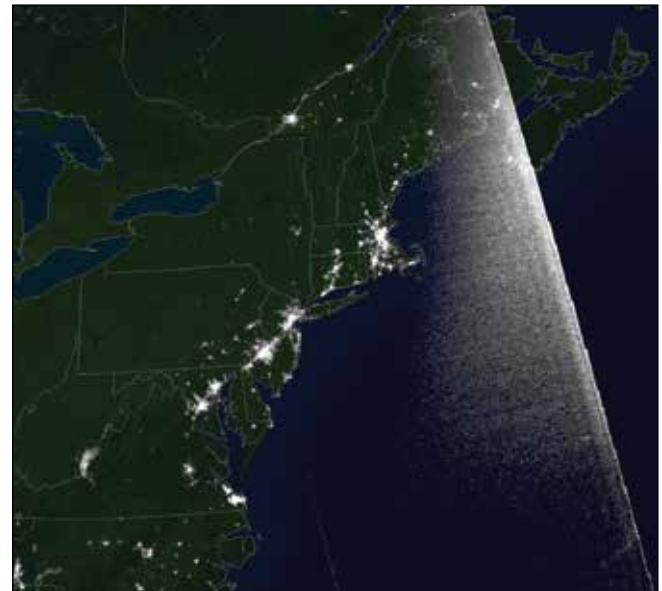
L'adoption de l'approche de la complexité implique l'incertitude des résultats. Tout comme le météorologue sait que son modèle de prévisions n'est pas certain à 100 pour 100, le praticien du concept de la complexité doit être prêt à accepter

NOAA



Avant la panne de courant du 14 août 2003.

NOAA



Pendant la panne de courant du 14 août 2003.

Sujets à controverse

La mise en application du concept de la complexité fait l'objet de controverses. Dans son manuel intitulé *What is Complexity Science, Really?*²⁶, S.E. Phelan déclare ceci : « La science de la complexité introduit une nouvelle façon d'étudier les lois de la nature qui sont détachées de la science traditionnelle. La science de la complexité laisse présumer que les causes, malgré leur simplicité, provoquent des effets complexes [TCO]. » Bien que des règles mathématiques simples aient occasionnellement expliqué des comportements similaires à ceux qui sont observables dans la nature ou la société, elles ne constituent pas une preuve que chaque phénomène complexe de l'univers est gouverné par un ensemble de règles simples.

La clarté est souvent absente de la signification de « système » dans les « systèmes complexes ». Également, le flou caractérise souvent les limites de la modélisation des systèmes complexes²⁷. Après tout, où la frontière entre un écosystème et le suivant se situe-t-elle? De telles situations sont fréquentes et présentent d'importants défis au moment de calibrer les modèles informatiques pour qu'ils présentent d'étroites corrélations avec les phénomènes observables dans le monde réel. À titre d'exemple, mentionnons le couple océan-atmosphère, où ni l'un ni l'autre système est indépendant de l'autre.

Aussi, de nombreux auteurs confondent « systèmes complexes » et « systèmes compliqués²⁸ [TCO] ». Pour établir la différence entre ces deux concepts, comparons une formation d'oiseaux migrateurs à un avion de chasse. Ces deux systèmes comportent de multiples composantes qui interagissent. Chaque composante de l'avion de chasse a un rôle clairement défini à jouer. Ces composantes ne peuvent s'adapter selon les circonstances comme peut le faire la formation d'oiseaux migrateurs. L'avion de chasse est en conséquence « compliqué », mais il n'est pas « complexe ».

Application de l'approche de la complexité

Les concepts de la complexité peuvent être utilisés séparément ou dans le cadre d'une approche intégrée pour décrire, comprendre ou modéliser un phénomène. Diverses méthodes peuvent être utilisées pour étudier les systèmes complexes. La

simulation au moyen d'un ordinateur constitue de loin la méthode préférée. Les simulations produisent une cascade de réflexions pour envisager divers scénarios possibles.

Les principales catégories de simulations informatiques des systèmes complexes comprennent la dynamique des systèmes (DS), l'automate cellulaire (AC) et les modèles basés sur les agents (MBA). Au niveau physique, la DS prend la forme d'équations qui représentent les lois de la physique, alors qu'au niveau de l'organisation elle comporte des abstractions de niveau plus élevé comprenant le traitement informatique en boucles et l'introduction de données qui, par exemple, peuvent représenter le succès d'une campagne de marketing.

L'AC comprend un grand nombre de composantes simples et identiques dont les interactions sont limitées aux composantes voisines. Les valeurs possibles de chaque composante appartiennent à un ensemble fini et évoluent à intervalles discrets. Les modèles basés sur les agents impliquent un certain nombre de preneurs de décisions (agents) décentralisés qui interagissent selon des règles prescrites²⁹.

Un nombre limité de systèmes de simulation génériques permettent la simulation DS des niveaux organisationnel et physique alors que de nombreux systèmes offrent les capacités de simulation AC et modèles basés sur les agents. Une récente étude³⁰ recense plus de 30 plateformes de simulation avec modèles basés sur les agents destinées à des travaux génériques. La majorité des applications AC forcent l'utilisation d'un ensemble particulier de règles et l'archétype dans le domaine est le « jeu de la vie³¹ » de John Conway. Pour ce qui est des applications axées sur le domaine militaire, de nombreux pays, y compris les États-Unis d'Amérique, la Nouvelle-Zélande et l'Australie ont développé des applications de simulation sophistiquée répondant à des besoins particuliers³².

Les simulateurs de modèles basés sur les agents gagnent en popularité, ils sont utilisés pour étudier un large éventail de phénomènes et d'activités allant du réseautage social et de la propagation des maladies jusqu'à la fabrication manufacturière et le combat³³. Des études de variation des impacts réalisées au moyen de modèles basées sur les agents démontrent que même une diminution de 50 pour 100 du trafic aérien ne réduirait pas de façon importante la propagation de certains types d'agents pathogènes. Les responsables de l'élaboration des politiques savent donc maintenant que l'imposition de restrictions aux déplacements aériens n'est probablement pas la mesure la plus efficace à prendre pour contrer les problèmes de santé comme ceux qui ont été causés par le syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS)³⁴.

Les applications informatiques militaires de modèles basés sur les agents servent entre autres à étudier les incidences de la détérioration des communications sur les troupes terrestres et à explorer et préparer l'intégration des navi-



National Geographic 1182545/Alaska stock images.

Oies blanches volant en tête de flèche.



Christos Nicolis et James Research Group, MIT, à l'adresse <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0049611>

Flambée épidémique du SRAS.

res sans équipage aux opérations navales. Elles servent aussi à explorer l'impact de l'utilisation de groupes de la taille d'escouade dans un environnement urbain³⁵. Une étude sur la détérioration des communications³⁶ a permis d'évaluer comment des facteurs comme la latence, la portée maximale, la taille de la zone tampon, la précision, la fiabilité et le brouillage affectent la capacité d'une organisation de mener une attaque au niveau de compagnie au moyen du système de combat de l'avenir (FCS). Le FCS peut compter sur des capacités létales ainsi que sur le réseautage et des capteurs modernes sur le champ de bataille qui permettent d'engager l'ennemi à distance de sécurité. Au moyen de l'outil de simulation MANA³⁷ avec la mer Caspienne comme champ de bataille fictif, l'impact des facteurs précédemment mentionnés sur les communications a été quantifié en effectuant le suivi des pertes et de la durée des combats. En procédant à un grand nombre de simulations avec différents paramètres, il a premièrement été déterminé que des communications dont la portée rejoint au plus 75 pour 100 de l'espace de combat ont d'importantes conséquences négatives sur l'issue des combats. En second lieu, ces simulations ont permis de constater que la lenteur des réseaux est presque aussi néfaste que des communications de portée réduite.

Le couplage du Dynamic Agent Representation of Networks of Systems (DARNOS)³⁸ avec une représentation graphique de l'espace de combat a également été fructueux. Cet arrangement a permis d'analyser différentes structures de réseautage de commandement et contrôle (C2) et d'évaluer l'efficacité opérationnelle d'une force en réseau³⁹. Une étude sur un groupe de la taille d'une escouade faite au moyen de modèles basés sur les agents a examiné la possibilité de réduire les effectifs de l'escouade d'infanterie de 12 à 9 membres tout en y incorporant le concept futuriste d'un véhicule robotique armé (VRA)⁴⁰.

L'étude a exploré l'incidence de changements apportés à diverses caractéristiques des forces bleues, par exemple en changeant la taille des escouades, le nombre d'escouades, les armes et la portée de capteurs dans un environnement urbain où se trouvent des forces rouges. D'intéressantes variations d'impacts mesurées lors des simulations permettent de conclure que les escouades comprenant 9 ou 12 soldats subissent un nombre similaire de pertes tant et aussi longtemps que leur VRA survit, mais que la surviabilité de plus petites escouades est fortement réduite si leur VRA ne fonctionne pas.

Dans la majorité des cas, les résultats des simulations peuvent être classés dans un nombre relativement restreint de catégories. Dans leur ouvrage intitulé *The Use of Complexity Science*, T.I. Sanders et J.A. McCabe mentionne ce qui suit au sujet des modèles basés sur les agents en particulier : « Lorsqu'ils sont utilisés à l'appui de la prise de décision dans l'univers réel, ces modèles basés sur les agents informatisés et interactifs améliorent notre réflexion et ils mènent à de meilleures solutions, à une diminution des conséquences indésirables et à un consensus plus large au sujet des importantes décisions concernant les politiques⁴¹ [TCO]. »

Au nombre des leçons apprises par la mise en pratique de la théorie de la complexité, il ressort clairement que le contexte et les antécédents historiques des systèmes complexes ont des incidences dans de nombreux domaines. Par exemple, « ...le succès d'un pays ne repose pas tant sur les vertus de sa population, la disponibilité de ressources naturelles et la compétence de son gouvernement que simplement sur une position qu'il a adoptée par le passé, de petits avantages obtenus au moment de son adoption entraînant de bien plus grands avantages plus tard⁴² [TCO]. » Cette dernière citation met également en lumière que dans le contexte de la gestion des connaissances et des stratégies d'apprentissage organisationnel « les pratiques exemplaires » pourront devoir céder la place aux « bons principes » parce que ce qui a fonctionné par le passé n'est pas un gage de succès pour l'avenir.

La mise en pratique de la théorie de la complexité permet également de retenir une autre importante leçon. La qualité des relations entre les personnes peut être plus importante que les personnes elles-mêmes. Par exemple, une équipe sportive composée des meilleurs joueurs jouant individuellement peut perdre aux mains d'une formation jouant en équipe composée de joueurs moins talentueux. La complexité implique également que les organisations hiérarchisées ne peuvent jamais être aussi résilientes que les réseaux complexes⁴³. Des concepts militaires intéressants consistent à contraindre les forces ennemies à adopter le mode du *chaos* ou celui de l'*équilibre*⁴⁴. Dans le mode du *chaos*, la force ennemie est forcée de prendre un grand nombre de décisions dans un court laps de temps, ce qui a potentiellement un effet déstabilisant. Dans le mode de l'*équilibre*, la force ennemie se rapproche du comportement linéaire, ce qui facilite la prévision de son comportement et permet de le vaincre plus facilement.



Photo Reuters RTR3B4, In prise par Suhail Salem.

Des membres des forces de sécurité du Hamas manifestent leur joie à l'occasion d'une cérémonie marquant la fin d'un cours dans leur enceinte de sécurité détruite, à Gaza, le 2 décembre 2012.

Les concepts de la complexité sont recherchés parce que leurs résultats proposent souvent des idées radicales et non conventionnelles, telles que la performance à la limite de la perte de contrôle, une condition dans laquelle le système est des plus adaptables, souples et énergiques. Lorsqu'on observe la complexité avec une loupe, le système qui s'adapte le mieux et le plus rapidement est celui qui prévaut. Lorsque le point de vue de la complexité est adopté, « ...l'accent est mis sur l'explication du monde plutôt que sur sa connaissance, sur la conception du futur plutôt que sur sa prévision, sur les efforts pour préserver la fluidité de la structure de force plutôt que sur la découverte de la bonne structure de force et enfin sur la libération du potentiel dynamique du système plutôt que sur le dépassement de ses limites⁴⁵ [TCO]. » Cette façon de voir les choses renforce la croyance que « ...la tolérance à l'incertitude est un facteur de réussite plus certain que les aptitudes cognitives⁴⁶. » La complexité « ...laisse également présumer que la prédiction de l'avenir à long terme est moins importante... que le maintien de la capacité d'apprendre et de s'adapter dans un environnement largement imprédictible qui change rapidement⁴⁷ [TCO]. » Une notion de complexité contre-intuitive inspirée de la nature veut que les organismes vivants adoptent habituellement des solutions *adéquates* plutôt que des solutions *optimales*.

Les concepts de la complexité ont déjà été utilisés pour étudier divers types d'opérations militaires⁴⁸. Au niveau tactique, les concepts empruntés de la théorie de la complexité ont mené à l'élaboration de nouvelles approches pour contrer les insurrections et le terrorisme⁴⁹. Il est intéressant de noter que les tactiques proposées ne privilégient pas l'élimination de certains membres de tels mouvements, elles suggèrent plutôt de cibler les liens qui existent entre ces membres. Pour reprendre l'analogie des réseaux, les combattants individuels, les cellules, les tribus et les clans représentent les nœuds du réseau et les liens entre ces nœuds constituent les liens entre les éléments du réseau. Dans cette analogie, les liens entre les nœuds du réseau peuvent entre autres choses être consti-

tués des moyens de communications, de la dépendance au financement, à l'idéologie, à la spiritualité ou à la technologie, ou de l'accès à des lieux sécurisés. Il est plutôt proposé d'adopter des tactiques visant à renforcer les liens du réseau pour en accroître la prévisibilité dans son ensemble ou d'en rompre les liens avec les éléments de sa base, qui jouissent d'un meilleur niveau d'adaptation.

Des évaluations *quantitatives* et des évaluations *qualitatives* des résultats obtenus au moyen des concepts de la complexité ont été effectuées. La campagne militaire gagnante du General Matthew Ridgway pendant la guerre de Corée a fait l'objet d'une analyse qualitative au moyen des concepts de la complexité dans le but de déterminer quel est leur potentiel comme fondement de l'exercice de l'art militaire⁵⁰. L'analyse comparative a démontré de fortes corrélations entre les concepts de la complexité et les décisions prises par le General Ridgway durant le conflit. Une évaluation quantitative a été effectuée pour comparer les résultats obtenus au moyen de deux modèles basés sur les agents avec ceux obtenus avec



General Matthew Ridgway.

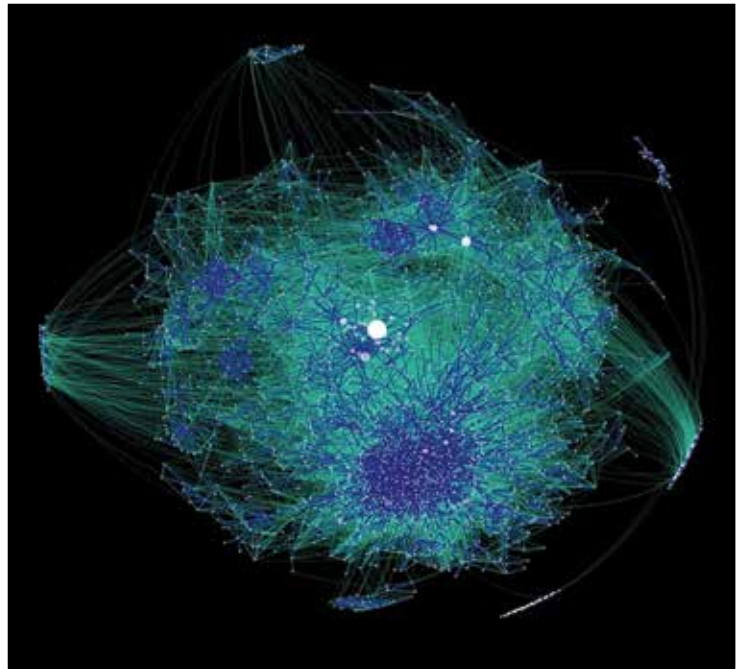
Defense Imagery, mil.HD-SN-96-07578.

JANUS, un simulateur interactif à haute résolution des combats terrestres communément utilisé dans le contexte d'escouade décrit précédemment⁵¹. Les résultats des trois types de simulation ont démontré de grandes similitudes pour ce qui est de la détermination des facteurs clés qui ont une incidence sur le rendement de l'escouade.

Recherches en cours et réseaux dynamiques

La recherche sur la complexité a originellement été motivée par les systèmes naturels et sociaux. Des nos jours, les chercheurs utilisent les concepts de la complexité pour comprendre et concevoir les systèmes qu'ils créent. Il y a dix ans, D.G. Green et D. Newth posaient la question suivante : « Comment pouvons-nous construire des systèmes artificiels dont les propriétés émergentes sont celles que nous voulons⁵² [TCO]? » Depuis, la simulation du concept d'émergence a eu tendance à se transformer en une investigation sur la façon dont on peut plutôt influencer les comportements émergents, tout en sachant que le « contrôle d'un système complexe » est un oxymore⁵³. Ce changement d'attitude coïncide avec le fait qu'il y a récemment eu une explosion des efforts de recherche dans le domaine des « réseaux complexes⁵⁴ [TCO] », une importante catégorie de systèmes complexes, puisqu'il était nécessaire de mieux comprendre les réseaux sociaux, la propagation des maladies, la stabilité des réseaux électriques et d'autres phénomènes encore. À peu près au même moment, D.G. Green⁵⁵, professeur en technologies de l'information, a démontré que tous les systèmes complexes héritent des propriétés d'une catégorie très générique de réseaux.

De nos jours, les questions liées à la dynamique des réseaux sont fort populaires au sein de la communauté du domaine de la complexité. Cette tendance est susceptible de persister dans un avenir rapproché, les chercheurs commençant tout juste à saisir l'importance des actions locales sur les

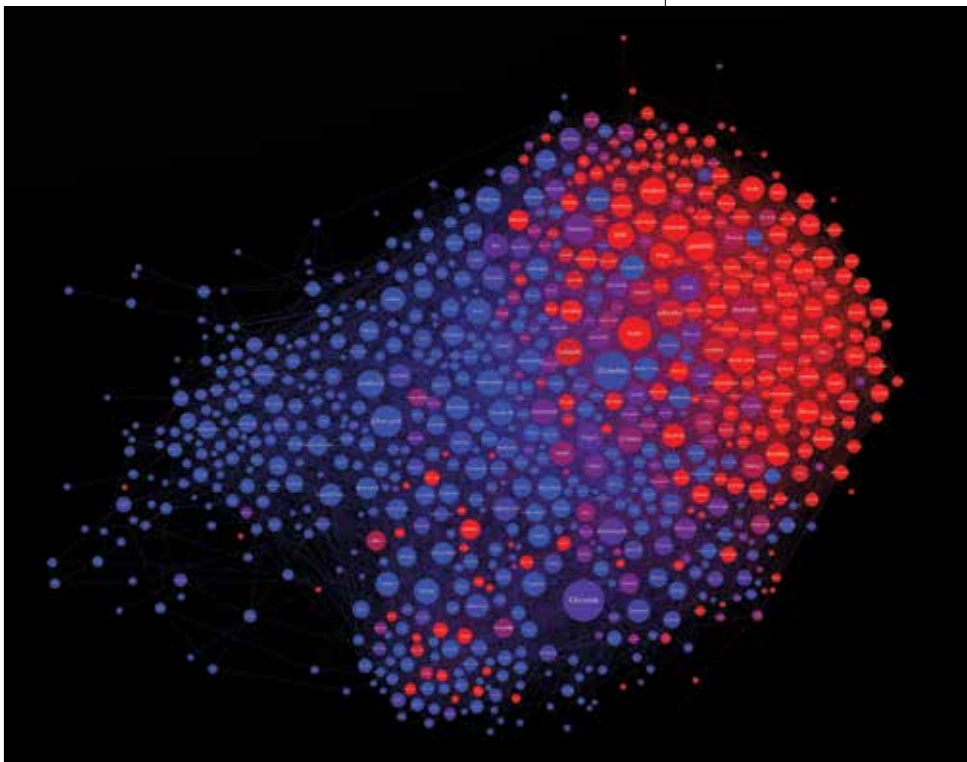


Modélisation d'une blogosphère.

Matthew Hursi/Science Photo library.

réseaux à grande échelle, c.-à-d. les rumeurs qui se répandent sur les réseaux sociaux ou les virus qui infiltrent les réseaux informatiques. Dans de nombreuses opérations militaires, les réseaux de communication de l'information et des données sont essentiels pour faire fonctionner des véhicules sans pilote et des capteurs situés à l'extérieur des appareils. Comme l'utilisation de tels systèmes est susceptible d'augmenter⁵⁶, nous serons bientôt confrontés au défi de gérer des réseaux hétérogènes dont les nœuds disposeront de capacités distinctes et de différents niveaux d'autonomie.

Les recherches actuelles sur les réseaux portent sur une vaste gamme d'activités couvrant des types de réseaux qui varient selon leurs structures, leurs lignes de communication et leurs origines naturelles ou artificielles. Une des principales questions consiste à déterminer quelles sont la connectivité et les règles nécessaires qui permettent d'éviter l'émergence de comportements indésirables. Il peut notamment être démontré que certaines conditions de connectivité doivent prévaloir pour que les agents dispersés d'un réseau puissent atteindre un consensus par l'échange de données⁵⁷. En l'absence de telles conditions, le consensus ne peut être atteint et chaque agent pourrait croire en une version de la vérité qui diffère beaucoup de celle des autres agents, ce qui diminuerait le potentiel de succès de la mission militaire. Les règles d'autonomie pourraient également dynamiquement changer sur les bases de la présence d'un réseau et de sa configuration, ce qui conduirait



Kovacs Boguța.

Réseau d'influence en Égypte.

à une évaluation *collective* plutôt qu'*individuelle* des situations. Par exemple, un réseau établi pourrait adopter un mode de « survie » et forcer des agents mobiles à manœuvrer en formation pour favoriser une forte connectivité du réseau.

Conclusion

Même en l'absence de fondements théoriques intégrés pour la complexité, les concepts, les outils et les principes connexes peuvent largement s'appliquer à la compréhension et à l'amélioration de l'efficacité militaire. Les applications qui offrent le plus de bénéfices sont celles où la vie et la métaphore des systèmes vivants présentent une description plus adéquate que celle qu'offrent les machines fonctionnant avec la précision d'une horloge. De nombreux exemples appuient la démonstration que les concepts de la complexité peuvent avoir un impact sur les décisions militaires prises aux niveaux tactique, stratégique et opérationnel.

Les systèmes complexes, qui sont dans une large mesure imprévisibles et incontrôlables, possèdent des caractéristiques communes applicables à de nombreuses disciplines. La recherche originelle sur la complexité était centrée sur l'investigation de comportements émergents de systèmes présents dans la nature et les sociétés. Cependant, les tendances des recherches récentes comprennent l'influence sur le comportement émergent des systèmes construits par l'homme.

Les conclusions découlant de l'application des concepts de la complexité mènent souvent à l'application de règles non conventionnelles qui favorisent l'autonomie, la décentralisation et l'adaptation et qui diminuent l'importance des prévisions à long terme et des hiérarchies rigides. De telles conclusions peuvent soulever de sérieuses oppositions de la part de nombreux établissements, y compris des formations militaires, parce qu'ils s'opposent d'une certaine façon à leur mode de pensée conventionnel.

Si votre monde est complexe, quels sont les avantages d'adopter le mode de pensée de la complexité? La complexité demeure le cadre théorique le plus prometteur disponible aujourd'hui pour étudier les sujets qui touchent les structures et les opérations militaires en raison de ses grandes similarités avec la façon dont les organismes vivants survivent par l'adaptation, la compétition et la coopération.

Remerciements

L'auteur remercie chaleureusement M. Daniel Hutt, Ph. D., pour les révisions méticuleuses qui ont amélioré de beaucoup la qualité de cette communication.



Victor Habbick visions/Science Photo Library.

Soldat-robot.

NOTES

1. F. Heylighen, "What is Complexity?" Principia Cybernetica Web, 9 December 1996.
2. D. Chu, R. Strand, and R. Fjelland, "Theories of Complexity: Common Denominators of Complex Systems," in *Complexity*, 2003, Vol. 8, No. 3, pp. 19-30.
3. T. Plate, "Complexity Science as a New Strategic Tool," in Quarterly Strategy Review CGEY Strategy & Transformation Practice Publication, April 2001, Vol. 1.
4. G. Rzevski, "Application of Complexity Science Concepts and Tools in Business: Successful Case Studies," 2009. Accessed on 20 September 2011 at www.complexitynet.eu.
5. Le mécanisme de l'horloge est une métaphore newtonnienne parce qu'il s'agit d'engrenages soigneusement agencés qui fonctionnent avec précision et de façon prévisible pour tenir le temps.
6. B.J. Zimmerman, « A Complexity Science Primer: What is Complexity Science and Why Should I Learn About It », *Edgeware – Primer* (2000).
7. « The Many Roots of Complexity Science ». Site consulté le 19 septembre 2011 à l'adresse http://tuvalu.santafe.edu/events/workshops/index.php/The_Many_Roots_of_Complexity_Science.
8. W.R. Ashby, *Introduction à la cybernétique*, Paris, Dunod, 1958.
9. Y. Bar-Yam, Complexity of Military Conflict: Multiscale Complex Systems Analysis of Littoral Warfare, Rapport du marché F30602-02-C-0158, 2003.
10. E.N. Lorenz, « Deterministic Nonperiodic Flow », *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 20 (1963), p. 130-141.
11. A.M. Saperstein, « War and Chaos », *American Scientist*, vol. 83 (1996), p. 548-557.
12. S. Milgram, « The Small World Problem », *Psychology Today*, vol. 2 (1967), p. 60-67.
13. J. Leskovec et E. Horvitz, « Planetary-Scale Views on an Instant-Messaging Network », délibérations de la 16th International Conference on World Wide Web, 2008.
14. A.K. Shaw, M. Tsvetkova et R. Daneshvar, « The Effect of Gossip on Social Networks », *Complexity*, vol. 16, n° 4 (2010), p. 39-47.
15. S. Wolfram, « Statistical Mechanics of Cellular Automata », *Reviews of Modern Physics*, vol. 55 (1983), p. 601-644.
16. S. Camazine, « Patterns in Nature », *Natural History* (juin 2003), p. 34-41.
17. C.W. Reynolds, « Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model », *Computer Graphics*, vol. 21, n° 4 (1987), p. 25-34.
18. S. Hauert, S. Leven, F. Ruini, A. Cangelosi, J.C. Zufferey et D. Floreano, « Reynolds Flocking in Reality with Fixed-wing Robots: Communication Range versus Maximum Turning Rate », compte rendu des délibérations de l'IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2011, p. 5015-5020.
19. M. Sageman, *Leaderless Jihad: Terror Networks in the Twenty-first Century*, Philadelphie, Pennsylvania, University of Pennsylvania Press, 2008.
20. D. Mackenzie, « The Science of Surprise - Can Complexity Theory help us understand the Real Consequences of a Convoluted Event like September 11 », *Discover Magazine* (2002).
21. B. Ramalingam, H. Jones, T. Reba, et J. Young, « Exploring the Science of Complexity: Ideas and Implications for Development and Humanitarian Efforts », *Development, Overseas Development Institute*, vol. 16 (2008), p. 535-543.
22. J.H. Holland, *Hidden Order: How Adaptation builds Complexity*, New York, Helix Books, 1995.
23. J.J. Goble, « Combat Assessment of Non-lethal Fires: The Applicability of Complex Modelling to Measure the Effectiveness of Information Operations », School of Advanced Military Studies, année académique 2001-2002, 2002.
24. P. Beautelement et C. Broenner, *Complexity Demystified: A Guide for Practitioners*, Axminster, Royaume-Uni, Triarchy Press, 2011.
25. D. Hendrick, « Complexity Theory and Conflict Transformation: An Exploration of Potential and Implications, University of Bradford », Center for Conflict Resolution, Department of Peace Studies, 2009.
26. S.E. Phelan, « What is Complexity Science, Really? », *Emergence*, vol. 3 (2001), p. 120-136.
27. K.A. Richardson, P. Celliers et M. Lissack, « Complexity Science: A Grey Science for the Stuff in Between », Compte rendu des délibérations de la 1st International Conference on Systems Thinking in Management, 2000, p. 532-537.
28. J. Wendell, « Complex Adaptive Systems: Beyond Intractability, Conflict Research Consortium », Boulder, Colorado, University of Colorado, Octobre 2003.
29. J.D. Farmer et D. Foley, « The Economy Needs Agent-based Modelling », *Nature*, vol. 460 (août 2009), p. 685-686.
30. R.J. Allan, « Survey of Agent Based Modelling and Simulation Tools », Rapport technique DL-TR-2010-007, Science and Technology Facilities Council (octobre 2010).
31. M. Gardner, « Mathematical Games – The Fantastic Combinations of John Conway's New Solitaire Game "Life" », *Scientific American*, vol. 223 (octobre 1970), p. 120-123.
32. On trouve notamment les applications Irreducible Semi-Autonomous Adaptive Combat (ISAAC) et Enhanced ISAAC Neural Simulation Toolkit (EINSTEIN) de l'US Marine Corps Combat Development Command. L'application Map Aware Non-uniform Automata (MANA) de la New Zealand Defence Technology Agency est orientée vers les combats terrestres et est utilisée pour modéliser la gestion de la violence civile, les activités de surveillance maritime et les patrouilles côtières. L'application BactoWars de l'Australian Defence Science and Technology Organization (DSTO) est quant à elle utilisée pour solutionner les problèmes sur les littoraux. Les applications Conceptual Research Oriented Combat Agent Distillation Implemented in the Littoral Environment (CROCADILE), Warfare Intelligent System for Dynamic Optimization of Missions (WISDOM) et Dynamic Agent Representation of Networks of Systems (DARNOS) ont également été développées par l'Australian Defence Force Academy et la DSTO.
33. V.E. Middleton, « Simulating Small Unit Military Operations with Agent-based Models of Complex Adaptive Systems », Compte rendu des délibérations de l'IEEE Winter Simulation Conference, 2010, p. 119-134.
34. Applications of Complexity Science for Public Policy – New Tools for Finding Unanticipated Consequences and Unrealized Opportunities, Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), septembre 2009.
35. T.M. Cioppa et T.W. Lucas, « Military Applications of Agent-based Simulations », compte rendu des délibérations de l'IEEE Winter Simulation Conference, 2004, p. 171-180.
36. *Ibid.*, p.173-175.
37. Voir la note 32.
38. *Ibid.*
39. M.F. Ling, « Nonlocality, Nonlinearity, and Complexity: On the Mathematics of Modelling NCW and EB », délibérations de la 22nd International Symposium on Military Operational Research, 2005.
40. Cioppa et Lucas, p. 178.
41. T.I. Sanders et J.A. McCabe, « The Use of Complexity Science » Washington Center for Complexity & Public Policy, octobre 2003.
42. Ramalingam *et al.*, p. 28.
43. M.F. Beech, « Observing Al Qaeda through the Lens of Complexity Theory: Recommendations for the National Strategy to Defeat Terrorism », Center for Strategic Leadership, article sur la recherche stratégique, 2004.
44. P.J. Blakesley, « Operational Shock and Complexity Theory », School of Advanced Military Studies, année académique 2004-2005, 2005.
45. C.R. Papparoni, R.A. Anderson et R.R. McDaniel, « Where Military Professionalism meets Complexity Science », *Armed Forces & Society*, vol. 34, n° 3 (2008), p. 433-449.
46. C. Rousseau, « La complexité et les limites de la visibilité actuelle de l'espace de combat », *Revue militaire canadienne*, vol. 4, n° 2 (été 2003), p. 35-44.
47. J. Gore, « Chaos, Complexity and the Military », National Defense University, National War College, 1996.
48. Par exemple en matière de commandement et contrôle, de planification stratégique, d'opérations de stabilisation, de soutien, d'opérations de maintien de la paix, de guerre asymétrique et de combats aériens et sur les côtes, de résolution des conflits, d'image commune de la situation opérationnelle, de terrorisme et de robustesse des réseaux.
49. D. Kilcullen, « Countering Global Insurgency », *Small Wars Journal*, 2004; Beech, p. 1-16.
50. E.D. Browne, « Comparing Theory and Practice – An application of Complexity Theory to General Ridgway's Success in Korea », monographie de la School of Advanced Military Studies, U.S. Army Command and General Staff College, 2010.
51. Cioppa et Lucas, p. 178.
52. D.G. Green et D. Newth, « Towards a Theory of Everything? – Grand Challenges in Complexity and Informatics », *Complexity International*, vol. 8 (2001), p. 1-12.
53. F. Heylighen, « Complexity and Self-Organization », *Encyclopedia of Library and Information Sciences*, 3^e éd., Boca Raton, Floride, Taylor and Francis, 2009, p. 1215-1224
54. S.H. Strogatz, « Exploring Complex Networks », *Nature*, vol. 410 (2001), p. 268-276.
55. D.G. Green, « Connectivity and the Evolution of Biological Systems », *Journal of Biological Systems*, vol. 2, n° 1 (1994).
56. Unmanned Systems Roadmap: 2007-2032, Washington, DC, Office of the Secretary of Defense, U.S.A. DoD, décembre 2007.
57. W. Ren, R.W. Beard et E.M. Atkins, « Information Consensus in Multivehicle Cooperative Control », *IEEE Control Systems*, vol. 27, n° 2 (avril 2007), p. 71-82.