

# Résumé des travaux

## 1 Bilan des travaux réalisés

La radio cognitive apparaît comme une solution naturelle aux problèmes d'échelle et de complexité résultant de la grande popularité des communications sans fil et de l'évolution des technologies radio. Ce nouveau paradigme est directement lié au développement de l'intelligence embarquée, objet de ce travail de thèse.

Dans ce mémoire de thèse, nous avons détaillé la conception d'un moteur cognitif contrôlant l'adaptation d'une radio à son contexte opérationnel. La solution proposée suit une approche originale basée sur une modélisation efficace du problème de conception à la volée. Elle s'inspire de la méthodologie de conception traditionnelle et elle s'appuie sur des techniques d'intelligence artificielle particulièrement adaptées pour la prise de décision autonome. Le comportement du moteur cognitif a été analysé en détail sur deux études de cas pour démontrer la pertinence des mécanismes développés.

Dans le **chapitre 2**, nous avons défini la notion d'intelligence pour une radio et nous avons étudié les solutions proposées pour la mettre en place. Nous avons ensuite réalisé une analyse critique des approches cognitives existantes afin d'établir un cahier des charges pour la conception de notre moteur cognitif. Nous le rappelons ici brièvement :

1. Le moteur cognitif doit s'affranchir de toute idéalisation mathématique en s'appuyant sur des capacités de prédiction.
2. Il doit pouvoir s'adapter à un nouveau problème en recherchant la solution optimale avec efficacité.
3. Il doit apprendre de ses expériences pour améliorer ses performances face aux problèmes fréquemment rencontrés.
4. Il doit faire évoluer son modèle prédictif au rythme des informations récoltées afin d'augmenter la fiabilité de ses décisions dans le temps (apprentissage incrémental).
5. Il doit savoir exploiter des connaissances expertes pour améliorer la fiabilité de ses mécanismes, augmenter leur rapidité et/ou réduire leur complexité.
6. Il doit maîtriser la complexité de ses processus afin de tenir compte des contraintes d'énergie et de prise de décision temps-réel.
7. Il doit s'appuyer sur des mécanismes suffisamment génériques pour être opérationnel sur de nombreux problèmes de reconfiguration dynamique.

Nous avons répondu à l'ensemble de ces objectifs.

Le moteur cognitif a été conçu à partir d'un modèle original issu de trois observations clés (**chapitre 3**). Nous les résumons ci-dessous en indiquant leur influence sur le développement des mécanismes proposés.

Premièrement, nous avons remarqué que la radio était gouvernée par des objectifs et des contraintes de différente nature. Nous les avons alors hiérarchisés en trois niveaux en fonction de leur impact sur la prise de décision. Le moteur cognitif reproduit cette hiérarchie dans sa manière de résoudre un problème de conception. Dans un premier temps, il profite des capacités du moteur d'inférence pour tenir compte des contraintes de faisabilité imposées par le cadre de régulation et de la flexibilité limitée des plateformes matérielles (modélisation experte du contexte opérationnel). Il s'appuie ensuite sur un modèle prédictif pour estimer l'impact du canal radio sur la réalisation des contraintes de performances (processus d'analyse prédictive). Il évalue enfin les préférences d'optimisation afin de rechercher la configuration la plus adaptée parmi les configurations compatibles avec le service requis (processus de décision).

Deuxièmement, nous nous sommes inspirés de la philosophie du soft computing en adoptant une démarche plus qualitative que quantitative afin de proposer un moteur cognitif efficace et robuste. Nous avons alors choisi de raisonner en termes de performances relatives plutôt qu'absolues. Cette démarche est à l'origine de la définition des échelles de performance<sup>1</sup> et d'optimalité<sup>2</sup>. Elle a présenté quatre avantages :

- Elle a simplifié la phase d'analyse prédictive en réduisant le nombre d'informations à mémoriser.
- Elle a introduit une certaine tolérance aux erreurs de prédiction.
- Elle a facilité la conception du processus d'expérimentation (le moteur cognitif navigue le long de l'échelle de performance locale pour réagir aux retours de l'environnement).
- Elle nous a permis d'identifier des connaissances expertes répondant à l'*objectif 5* (le moteur cognitif explore son espace de conception plus efficacement s'il dispose d'un graphe de robustesse particulièrement instructif).

Troisièmement, nous avons traité la tâche de prédiction des performances comme un problème de classification. Nous sommes alors parvenus à donner une interprétation claire de l'espace de conception et des décisions prises par notre moteur cognitif. Cette compréhension nous a permis de mieux orienter nos choix méthodologiques. Elle est aussi à l'origine des mécanismes avancés que nous proposons comme perspectives à ces travaux.

Pour implémenter le modèle, nous avons sélectionné des techniques d'intelligence artificielle affichant des propriétés excellentes dans un contexte de radio cognitive. Ces techniques nous ont permis notamment de répondre aux *objectifs 1, 3 et 4*. Les systèmes connexionnistes évolutifs<sup>3</sup> permettent au moteur cognitif de mémoriser et d'optimiser le modèle prédictif garant de la qualité des décisions prises. Les automates d'apprentissage<sup>4</sup> contrôlent le dilemme exploration/exploitation localement afin de limiter les risques d'expérimentation en fonction de l'expérience du moteur cognitif.

Nous avons proposé une architecture pour structurer les opérations de modélisation, de raisonnement et d'apprentissage. Nous avons décrit les mécanismes cognitifs au **chapitre 4** pour un espace de conception totalement ordonné. Nous les avons ensuite généralisés au **chapitre 5**

---

1. L'échelle de performance permet au moteur cognitif de raisonner sur la difficulté du problème. Elle ordonne les configurations en fonction de leur robustesse face aux contraintes de qualité de service (le nombre d'erreurs de transmission dans notre cas).

2. L'échelle d'optimalité exprime la satisfaction intrinsèque de chaque configuration vis-à-vis du compromis recherché. Elle range les configurations en fonction de leur optimalité potentielle vis-à-vis des objectifs d'optimisation (réduire la consommation d'énergie, maximiser le débit de transmission).

3. N. Kasabov, *Evolving Connectionist Systems. The Knowledge Engineering Approach*, 2nd ed., Springer, New York, 2007.

4. M. A. L. Thathachar and P. S. Sastry, "Varieties of learning automata : An overview," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 32, no. 6, pp. 711-722, Dec. 2002.

pour traiter le cas plus complexe d'un espace de conception partiellement ordonné. Le moteur cognitif s'appuie sur quatre processus coordonnés par un algorithme de supervision :

- Le processus d'analyse prédictive a deux rôles. Premièrement, il parcourt les bases de connaissances évolutives afin d'évaluer l'adéquation des configurations en fonction de la difficulté du problème (conditions de propagation, exigences de QoS). Deuxièmement, il analyse la stratégie locale d'exploration afin d'estimer l'expérience du moteur cognitif sur la région de l'espace de conception visitée.
- Le processus de décision est activé avec une grande probabilité lorsque la région semble bien caractérisée au regard de la stratégie d'exploration (exploitation des connaissances). Le moteur cognitif sélectionne alors l'alternative la plus satisfaisante parmi les configurations validées par le modèle prédictif.
- Le processus d'expérimentation est déclenché si le moteur cognitif estime que ses connaissances ne sont pas optimales (i.e. la probabilité locale d'exploration est élevée) ou s'il doit réagir à une erreur de prédiction (exploration de l'espace de conception). Le moteur cognitif s'appuie alors sur l'échelle de performance identifiée et sur le graphe de robustesse embarqué pour tenter de se rapprocher du comportement optimal tout en minimisant les erreurs de décision. Cette démarche exploratoire permet au moteur cognitif de s'adapter à toute nouvelle situation (*objectif 2*).
- Le processus d'apprentissage assimile les informations déduites de l'expérimentation afin d'augmenter la fiabilité et la qualité du modèle prédictif. Il met à jour les bases de connaissances entretenues par les systèmes connexionnistes évolutifs et il actualise la stratégie stochastique d'exploration.

Le moteur cognitif a été testé sur deux problèmes de conception dynamique du lien radio. Nous avons proposé un ensemble d'indicateurs de performance afin d'analyser son comportement en détail. Les résultats obtenus nous ont permis de valider l'approche adoptée dans ce travail de thèse. Le moteur cognitif parvient à trouver la solution optimale pour la grande majorité des problèmes traités (95% en moyenne) et il devient de plus en plus efficace dans sa recherche de la solution adaptée. Il perfectionne son expertise sur l'espace de conception en accumulant de l'expérience et il apprend à gérer ses phases d'exploration afin de limiter les risques d'expérimentation. Il peut aussi profiter de connaissances expertes pour améliorer ses performances tout en étant capable de s'en affranchir par apprentissage. La radio dotée de notre moteur cognitif est capable de garantir la qualité de service requise à l'utilisateur en optimisant la gestion des ressources disponibles. Elle est capable également de moduler les objectifs de conception en fonction de son contexte opérationnel.

Dans le **chapitre 6**, nous avons présenté les mécanismes avancés que nous avons identifiés pour répondre aux *objectifs 6 et 7*. Nous avons proposé de nombreuses améliorations pour réduire la complexité des mécanismes cognitifs et nous avons suggéré plusieurs pistes pour traiter le cas d'un environnement variable dans le temps et d'un espace de conception plus complexe (multiplication des contraintes de performance, augmentation de la flexibilité des équipements radio). Les perspectives envisagées n'ont pas encore été validées expérimentalement. Nous avons amorcé la conception et le développement d'une plateforme de démonstration basée sur GNU Radio pour que ces travaux soient poursuivis.

Nos mécanismes sont suffisamment génériques pour être adaptés à d'autres applications de la radio cognitive comme l'accès opportuniste au spectre. L'approche proposée peut également être exportée à des couches plus élevées de la pile protocolaire. Nous espérons de ce fait que notre solution saura inspirer d'autres travaux poussant le concept de radio cognitive à un niveau encore plus élevé et plus opérationnel.

## 2 Contributions

La table 1 résume les contributions des travaux de recherche réalisés dans le cadre de cette thèse. Ces travaux ont été valorisés au travers de 4 communications et d'un article de revue. De nombreux résultats obtenus tardivement restent encore à être publiés. En parallèle de la thèse, j'ai participé au projet IST ORACLE sur la prise de décision autonome dans un contexte d'accès opportuniste au spectre. Ma contribution s'est concrétisée par deux rapports collaboratifs référencés ci-dessous avec les papiers publiés.

<b>Contributions conceptuelles</b>
Analyse des objectifs de conception en fonction de leur impact sur la prise de décision.
Modélisation originale du problème de prédiction des performances représenté comme un problème de classification. Le modèle découle de l'observation graphique de l'espace de conception. Il a donc l'avantage d'être facilement interprétable.
Identification de connaissances expertes permettant d'assister le moteur cognitif dans ses prises de décision. Ces connaissances introduisent des relations d'ordre entre les alternatives disponibles. Elles sont imprécises donc robustes et faciles à obtenir (au préalable ou en ligne). Elles sont codées efficacement sous la forme d'un graphe acyclique orienté directement exploitable par le moteur cognitif.
Conception d'un processus d'expérimentation embarqué. Le moteur cognitif s'appuie sur ses capacités de prédiction et sur des connaissances expertes pour structurer son exploration de l'espace de conception et minimiser les risques de mauvaises décisions.
Gestion innovante du dilemme exploration/exploitation. Le moteur cognitif apprend à contrôler ses expérimentations en fonction de la confiance qu'il porte dans ses connaissances.
Mise au point d'un processus d'apprentissage incrémental pour l'acquisition automatique des connaissances.
Réflexions sur les conditions d'application du moteur cognitif à des problèmes plus complexes et plus réalistes.
<b>Contributions méthodologiques</b>
Classification des approches cognitives existantes en trois courants dominants.
Organisation des mécanismes cognitifs selon une architecture structurée, modulaire et évolutive.
Sélection de techniques d'intelligence artificielle appropriées. Ces techniques, alors absentes de l'état de l'art sur la radio cognitive, s'avèrent être particulièrement adaptées à la prise de décision autonome.
Mise en place d'un cadre évaluation pour expliquer et valider le comportement du moteur cognitif.
<b>Contributions techniques</b>
Implémentation effective du moteur cognitif sur un simulateur C++.
Caractérisation complète de la solution, ses performances et ses limites. Les résultats présentés confirment la pertinence des mécanismes cognitifs proposés.

TABLE 1 – Contributions des travaux de recherche réalisés dans le cadre de la thèse

**Article de revue internationale**

N. Colson, A. Kountouris, A. Wautier, L. Husson, "A Generic Cognitive Framework for Supervising the Radio Dynamic Reconfiguration. An AI approach based on design problem classification", Annals of Telecommunications, special issue on Cognitive Radio, to be published

**Communications internationales avec actes**

N. Colson, A. Kountouris, A. Wautier, L. Husson, "Autonomous Decision Making Process Supporting Cognitive Waveform Design", Proc. PIMRC08, Cannes, France, Sept. 2008

N. Colson, A. Kountouris, A. Wautier, L. Husson, "Autonomous Decision Making Process for Dynamic Reconfiguration of Cognitive Radios", Proc. ICCCN08, Virgin Island, USA, Aug. 2008

N. Colson, A. Kountouris, A. Wautier, L. Husson, "Cognitive Decision Making Process Supervising the Radio Dynamic Reconfiguration", Proc. CROWNCOM08, Singapore, May 2008

**Participation au projet IST européen ORACLE**

B. Bochow, S. Chantaraskul, N. Colson, A. Kountouris, K. Moessner, S. Thilakawardana, J. Tiemann, "Definition of context filtering mechanisms and policy framework", ORACLE WP4, Deliverable D4.2, May 2007

B. Bochow, N. Colson, L. Huang, A. Kountouris, K. Moessner, S. Thilakawardana, M. Smirnov, "Draft OR Policy Framework", ORACLE WP4, Deliverable D4.1, Nov. 2006

**Communication nationale sans acte**

N. Colson, A. Kountouris, "Une application de la radio intelligente : Adaptation dynamique de la complexité algorithmique", Journées Scientifiques du CNFRS intitulée "Vers des radiocommunications reconfigurables et cognitives", Paris, France, Mars 2006

**Rapports internes**

N. Colson, A. Kountouris "Wireless Radio and the Internet of Things : a case for Cognitive Radio", Tech. Report, France Telecom R&D, Novembre 2007

N. Colson "Étude bibliographique : Réseaux de neurones", Tech. Report, France Telecom R&D, Novembre 2006

N. Colson "Étude bibliographique : Techniques de prise de décision", Tech. Report, France Telecom R&D, Octobre 2006

N. Colson "Étude bibliographique : Canal radio", Tech. Report, France Telecom R&D, Octobre 2006

N. Colson "Étude bibliographique : Logique floue et théorie des possibilités", Tech. Report, France Telecom R&D, Septembre 2006

N. Colson "Étude bibliographique : Systèmes experts et systèmes experts flous", Tech. Report, France Telecom R&D, Août 2006