

Projet ANR-19-CE25-0013-01

QCSP

Programme PRCE 2019

A	IDENTIFICATION.....	2
B	RESUME CONSOLIDE PUBLIC	2
B.1	Instructions pour les résumés consolidés publics	2
B.2	Résumé consolidé public en anglais.....	4
C	MEMOIRE SCIENTIFIQUE.....	6
C.1	Résumé du mémoire	6
C.2	Enjeux et problématique, état de l’art	7
C.3	Approche scientifique et technique.....	7
C.4	Résultats obtenus	8
C.5	Exploitation des résultats.....	11
C.6	Discussion	12
C.7	Conclusions.....	12
C.8	Références.....	12
D	LISTE DES LIVRABLES.....	13
E	IMPACT DU PROJET	14
E.1	Indicateurs d’impact	14
E.2	Liste des publications et communications.....	15
E.3	Liste des éléments de valorisation.....	16
E.4	Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires)	18

A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	QCSP
Titre du projet	Quasi-Cyclic Short Packets
Coordinateur du projet (société/organisme)	Emmanuel Boutillon (Université Bretagne Sud)
Période du projet (date de début – date de fin)	11/2019-09/2023
Site web du projet, le cas échéant	https://qcsp.univ-ubs.fr/

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	M. Emmanuel Boutillon
Téléphone	06 75 66 94 06
Adresse électronique	Emmanuel.boutillon@univ-ubs.fr
Date de rédaction	30/09/2023

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	CEA (Valentin Savin), Orange Labs (Louis-Adrien Dufrène), ETIS/ENSEA (Fakhreddine Ghaffari), Lab-STICC/IMT-Atlantique (Catherine Douillard), IMS/Bordeaux-INP (Bertrand Le Gal).
---	--

B RESUME CONSOLIDE PUBLIC

Ce résumé est destiné à être diffusé auprès d'un large public pour promouvoir les résultats du projet, il ne fera donc pas mention de résultats confidentiels et utilisera un vocabulaire adapté mais n'excluant pas les termes techniques. Il en sera fourni une version française et une version en anglais. Il est nécessaire de respecter les instructions ci-dessous.

B.1 INSTRUCTIONS POUR LES RESUMES CONSOLIDES PUBLICS

Un nouveau protocole pour l'internet des objets

Dans le monde de l'internet des objets, les applications dites « massives » (bâtiments intelligents, logistique du transport, ...) se caractérisent par la très forte densité d'appareils connectés, leur très faible débit de communication et leur contraintes très fortes en termes de coût et d'autonomie. L'optimisation d'un tel réseau pose de nombreux problèmes. En effet, vouloir coordonner une myriade d'utilisateurs pour éviter qu'ils ne se brouillent entre eux impliquerait d'échanger principalement des messages de coordination au détriment des messages portant l'information ! En pratique, il faut donc apprendre à se passer de coordination. Pour ce faire, les structures de trame classiques comportent un préambule pour aider le récepteur à détecter et à synchroniser correctement les trames reçues. Toutefois, ces préambules sont aussi une perte d'efficacité, surtout pour des messages de petites tailles. La réduction des surcoûts de transmission de "méta-données" (signalisation, synchronisation, authentification) est donc nécessaire pour permettre le déploiement de réseaux IoT efficaces. Cette réduction peut toutefois se faire simplement en regroupant toutes ces fonctions et le message proprement dit, dans une seule et même trame bien protégée par un code correcteur d'erreur puissant. Le projet QCSP (Quasi Cyclic Short Packet) porte ainsi une idée très novatrice par rapport à l'existant.

D'une idée jusqu'à des expérimentations en milieux mobiles et maritime

Le pari du projet QCSP est de promouvoir l'émergence des codes non-binaire combinés avec une modulation dite « Cyclic Code Shift Keying (CCSK) ». Cette modulation offre de nombreux avantages comparés à l'état de l'art : elle permet l'auto-synchronisation, l'auto-identification et elle autorise des réceptions correctes à rapport signal sur bruit largement en dessous de 0 dB. Pour réaliser cette ambition, le projet a tout d'abord exploré la problématique de construction de bons codes correcteurs non-binaires et les algorithmes de décodage associés (codes polaires, en particulier). Nous avons ensuite défini des algorithmes de détection et de synchronisation des trames CCSK-NB-Code en considérant la trame elle-même comme une séquence de préambule grâce à leur structure particulière. Cette étude comporte un modèle théorique de performance, des résultats de simulation logicielle et la validation hors ligne par l'utilisation de carte GNU Radio. Enfin, nous avons réalisé l'implémentation mixte (hardware FPGA et logiciel) du récepteur de trame QCSP temps réel et effectué des campagnes de mesures dans le milieu urbain et maritime. Pour terminer, des travaux novateurs ont été réalisés pour combiner modulation CCSK et modulation OFDM pour permettre directement la transmission de messages très courts dans les premières étapes d'établissement d'une liaison 5G.

Résultats majeurs du projet

- Dans le domaine encore très peu exploré des codes polaires non-binaire, nous avons proposé des codes et des simplifications des algorithmes de décodages originaux (3 partenaires impliqués).
- Proposition d'algorithmes nouveaux pour le décodage des codes non-binaires (brevets et publications).
- Orange Lab : dépôts de 9 brevets sur l'association de trame CCSK avec de l'OFDM.
- Preuve de concept des trames QCSP par la mise en œuvre de campagne de mesure temps réel en utilisant des cartes GNU Radio. Différentes campagnes de mesure en milieu mobiles et maritimes (avec la société Thalos) (deux partenaires impliqués).
- Contrat « recherche-technologie » avec le CNES et la société KINEIS pour étudier l'utilisation de trames QCSP pour des applications IoT par satellite.

Production scientifique et brevets depuis le début du projet

Jusqu'à présent, le projet QCSP a donné lieu à deux publications de revue (dont une IEEE Transactions on Communications), seize publications en conférences internationales et à 9 brevets [b1-b9] auxquels il faut ajouter 5 brevets en cours de dépôt. Il est à noter que l'un des brevets a déjà donné lieu à une vente d'option sur licence.

La figure ci-dessous représente une vue d'une carte interactive permettant de restituer les résultats de la deuxième campagne de mesure en milieu urbain des trames QCSP. La trajectoire du véhicule est représentée sur la carte de Lorient et la position à chaque instant d'émission est indiquée par un point vert si la trame a été reçue correctement, rouge sinon. En cliquant sur les points verts, il est possible de visualiser les données reçues au moment de la réception (cette carte est en accès libre sur le site <https://qcsp.univ-ubs.fr>, dans la rubrique « event »).



Figure 1 : Vue de la carte interactive retraçant une expérimentation temps réel de transmission de trames QCSP en milieu urbain radio-mobile (accès directe à la carte : http://www-labsticc.univ-ubs.fr/~boutillon/QCSP_exp/index.html#15/47.7473/-3.3951).

Informations factuelles

Le projet QCSP est un projet de recherche collaborative-entreprise coordonné par l'Université Bretagne Sud. Il associe Orange Labs et le CEA ainsi que les laboratoires ETIS, Lab-STICC/IMT-Atlantique et IMS. Le projet a commencé en octobre 2019 et a duré 48 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 643450,42 € pour un coût global de l'ordre de 1 600 000 €.

B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

A new protocol for the Internet of Things

In the world of the Internet of Things (IoT), so-called "massive" applications (intelligent buildings, transport logistics, etc.) are characterized by the very high density of connected devices, their very low communication rates, and their very strong constraints in terms of cost and autonomy. Optimizing such a network poses numerous problems. Indeed, trying to coordinate a myriad of users to prevent them from interfering with each other would mean exchanging mainly coordination messages, to the detriment of messages carrying information! In practice, we have to learn to do without coordination. To this end, conventional frame structures include a preamble to help the receiver detect and correctly synchronize received frames. However, these preambles are also a loss of efficiency, especially for small messages. Reducing the overhead of transmitting "metadata" (signaling, synchronization, authentication) is therefore necessary to enable the deployment of efficient IoT networks. This can be achieved, however, simply by grouping all these functions together with the message itself, in a single frame well protected by powerful error-correcting code. The QCSP (Quasi Cyclic Short Packet) project is a highly innovative idea.

From an idea to experiments in mobile and maritime environments

The aim of the QCSP project is to promote the emergence of non-binary codes combined with Cyclic Code Shift Keying (CCSK) modulation. This modulation offers numerous advantages compared with the state of the art: it enables self-synchronization and self-identification, and allows correct reception with a signal-to-noise ratio well below 0 dB. To achieve this ambition, the project first explored the problem of constructing good non-binary corrector codes and the associated decoding algorithms (polar codes, in particular). We then defined algorithms for detecting and synchronizing CCSK-NB-Code frames, considering the frame itself as a preamble sequence thanks to their particular structure. This study includes a theoretical performance model, software simulation results and off-line validation using GNU Radio cards. Finally, we carried out a mixed implementation (FPGA hardware and software) of the QCSP real-time frame receiver, and carried out measurement campaigns in urban and maritime environments. Finally, innovative work has been carried out to combine CCSK and OFDM modulation to directly enable the transmission of very short messages in the early stages of establishing a 5G link.

Major results of the project

- In the little-explored field of non-binary polar codes, we have proposed original codes and simplifications of decoding algorithms (3 partners involved).
- Proposal of new algorithms for decoding non-binary codes (patents and publications).
- Orange Lab: 9 patents filed (or ongoing) on the association of CCSK frames with OFDM.
- Proof of concept of QCSP frames through real-time measurement campaigns using GNU Radio cards. Various measurement campaigns in mobile and maritime environments (with Thalys) (two partners involved).
- Research-technology contract with CNES and KINEIS to study the use of QCSP frames for satellite IoT applications.

Scientific output and patents since the start of the project

To date, the QCSP project has resulted in two journal publications (including one IEEE Transactions on Communications), sixteen publications at international conferences and 9 (+5) patents. It should be noted that one of these patents has already led to the sale of a license option.

The figure below shows a view of an interactive map displaying the results of the second urban QCSP frame measurement campaign. The vehicle's trajectory is shown on the map of Lorient, and its position at each instant of transmission is indicated by a green dot if the frame was received correctly, red if not. By clicking on the green dots, it is possible to view the data received at the time of reception (this map is freely accessible on the <https://qcsp.univ-ubs.fr> website, in the "events" section).



Figure 1: View of the interactive map showing a real-time QCSP frame transmission experiment in a mobile-radio urban environment (direct access to the map : http://www-labsticc.univ-ubs.fr/~boutillon/QCSP_exp/index.html#15/47.7473/-3.3951).

Factual information

The QCSP project is a collaborative research-company project coordinated by the Université Bretagne Sud. It involves Orange Labs and the CEA, as well as the ETIS, Lab-STICC/IMT-Atlantique and IMS laboratories. The project began in October 2019 and lasted 48 months. It received ANR funding of €643450.42.

C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

Mémoire scientifique confidentiel : non

C.1 RESUME DU MEMOIRE

Dans le monde de l'internet des objets, les applications dites « massives » (bâtiments intelligents, logistique du transport, ...) se caractérisent par la très forte densité d'appareils connectés, leur très faible débit de communication et leur contraintes très fortes en termes de coût et d'autonomie. L'optimisation d'un tel réseau pose de nombreux problèmes. En effet, vouloir coordonner une myriade d'utilisateurs pour éviter qu'ils ne se brouillent entre eux impliquerait d'échanger principalement des messages de coordination au détriment des messages portant l'information ! En pratique, il faut donc apprendre à se passer de coordination. Pour ce faire, les structures de trame classiques comportent un préambule pour aider le récepteur à détecter et à synchroniser correctement les trames reçues. Toutefois, ces préambules sont aussi une perte d'efficacité, surtout pour des messages de petites tailles. La réduction des surcoûts de transmission de "méta-données" (signalisation, synchronisation, authentification) est donc nécessaire pour permettre le déploiement de réseaux IoT efficaces. Cette réduction peut toutefois se faire simplement en regroupant toutes ces fonctions et le message proprement dit, dans une seule et même trame bien protégée par un code correcteur

d'erreur puissant. Le projet QCSP (Quasi Cyclic Short Packet ») porte ainsi une idée très novatrice par rapport à l'existant.

C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

Dans le monde de l'internet des objets (IoT), il existe deux grandes catégories d'application : les applications "critiques" (sécurité routière, véhicules automatisés...) et les applications "massives" (bâtiments intelligents, logistique des transports...). Les applications massives se caractérisent par une densité élevée de dispositifs connectés (1 million/km² selon les exigences de l'IMT-2020), de petites charges utiles de données, ainsi que des contraintes strictes en matière de consommation d'énergie et de coût des dispositifs.

Maximiser l'efficacité spectrale d'un réseau IoT est une condition préalable essentielle pour fournir une connectivité massive. Au niveau de la liaison, elle peut tirer parti de codes de contrôle d'erreur puissants tels que les codes non-binaires (NB). Au niveau du système, la réduction du débit des "métadonnées", c'est-à-dire l'échange d'informations liées à la signalisation, à la synchronisation et à l'identification, est le nouveau paradigme des réseaux IoT massifs [DUR16]. Cela nécessite d'englober ces fonctions dans un cadre unique bien protégé. La première vague de normes IoT est loin d'atteindre les objectifs de fiabilité et d'efficacité spectrale : elles mettent en œuvre des schémas de correction d'erreur en aval (FEC) sous-optimaux tels que des codes convolutifs ou turbo-codes combinés à des codes à répétition (EC-GSM [GSM], Narrow Band-IoT et LTE-M [3GPP]), de simples codes de Hamming (LoRa [LORA]), ou omettent tout simplement toute capacité de correction (SigFox [SIGFOX]).

L'objectif du projet QCSP est de contribuer à l'évolution des réseaux IoT en définissant, en mettant en œuvre et en testant un nouveau schéma de modulation codée dédié aux réseaux IoT. Le "grand pari" du projet est de travailler sur l'émergence de codes NB combinés à une modulation CCSK (Cyclic Code Shift Keying). Ce nouveau schéma de modulation codée, appelé CCSK-NB-code [ABA13, ABA14], peut être facilement mis en œuvre de manière efficace au niveau de l'appareil. Le code CCSK-NB présente plusieurs avantages par rapport aux formes d'onde actuelles : il offre des capacités d'auto-synchronisation et d'auto-identification et peut fonctionner à des rapports signal/bruit (SNR) très faibles.

C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Le projet est structuré en quatre work-package (WP). Le premier WP est dédié au codes correcteurs d'erreurs non-binaires. Dans un souci d'exhaustivité, les versions non-binaires des grandes familles de code existants ont été étudiées et comparées entre elles, à savoir, les Turbo-codes non-binaires (Lab-STICC/IMT-A), les codes LDPC non-binaire (UBS) et enfin, les codes Polaires non-binaire (CEA, ETIS, Lab-STICC/UBS). Le second WP concerne tous les algorithmes de synchronisation et de détection de trame QCSP. Cette étude a été réalisée dans deux directions complémentaires : dans le contexte mono-porteuse (Lab-STICC/UBS) et le contexte multi-porteuse (Orange Labs). Le troisième WP (IMS, Lab-STICC/UBS) concerne la mise en place de démonstrateur. Quatre campagnes de mesure ont été réalisées, deux en milieu mobile urbain et deux en milieu maritime (lien bouée-bateau), en partenariat avec la

société Thalos. Enfin, le WP4 concerne la protection, la diffusion et la valorisation des travaux effectués dans le projet QCSP.

C.4 RESULTATS OBTENUS

Il nous a semblé logique de présenter les résultats obtenus en suivant la structure des trois WP techniques du projet.

WP1. Construction/décodage de code non-binaires

Dans le domaine des turbocodes non-binaires (NB), de nouveaux codes ont été construits sur la base d'un accumulateur NB amélioré proposé dans des travaux antérieurs [KADF18]. En outre, les principes de construction des meilleurs entrelaceurs jusqu'à présent proposés pour les codes binaires [GAD18], ont été étendus aux codes NB. Il a été démontré que cette structure d'entrelaceur améliorerait les performances de correction tout en assurant une régularité favorable à une mise en œuvre matérielle simplifiée. Une procédure de poinçonnage périodique a ensuite été introduite, permettant une grande flexibilité en termes de rendement de codage et une redondance incrémentale au symbole près, sans effet pénalisant sur la performance de correction. La technique de poinçonnage a donné lieu à un dépôt de brevet [b1]. Les turbocodes NB permettant d'obtenir des taux d'erreurs extrêmement faibles sans plancher d'erreur, un compromis a été proposé dans le choix des codes convolutifs constituants pour favoriser les performances à rapport signal-à-bruit faible. Des codes ont été conçus pour les corps de Galois GF(64) et GF(256) pour l'ensemble des tailles de trame et de rendements de codage spécifiés dans le livrable D1.1. Ils ont été optimisés pour une association avec une constellation 4-QAM dans une première phase puis avec une modulation CCSK dans une seconde phase. L'étude s'est ensuite prolongée par des travaux sur l'application de l'algorithme dit « Local SOVA » [LABD20] au décodage des NB turbo-codes. Une variante peu complexe de l'algorithme qui ne prend en compte qu'un nombre limité de symboles de constellations concurrents les plus proches a été proposée pour le calcul de l'information extrinsèque, permettant une réduction allant jusqu'à 50 % sans perte de performance de correction et pouvant même atteindre 80 % en visant des rendements de codage élevés ou des taux d'erreurs trames supérieurs à 10^{-4} [c14]. La réduction de complexité obtenue représente une avancée significative vers la mise en œuvre matérielle. Des travaux connexes ont également été menés sur l'optimisation conjointe des paramètres du code et des positions des symboles de modulation dans la constellation à l'aide d'un algorithme Deep Q-Network multi-agents [c7].

Dans le domaine des décodeurs NB LDPC, une nouvelle architecture significativement plus efficace que l'état de l'art a été proposée : « the Best, the Requested and the Default ». Cette technique consiste à « engager un dialogue » entre les messages échangés durant les itérations de décodage. Schématiquement, pour chaque lien entre une variable et une contrainte de parité, une partie du message parité-vers-variable généré par le nœud de parité est spécifiquement liée à l'information du message variable-vers-check associé. Cette technique peut sembler violer le principe bien établi « de message extrinsèque » propre aux algorithmes de propagation de croyance. Il n'en est toutefois rien et au contraire, elle permet la focalisation

des calculs sur des hypothèses pertinentes. Cet algorithme a été breveté [b3] et donné lieu à deux publications en conférences [c5, c12].

Les codes polaires non-binaires sur $GF(64)$ était, au début du projet, un domaine très peu exploré. Le projet QCSP a permis de définir une technique de construction des codes polaires non-binaires très efficaces, tant pour le canal BSPK que pour les modulations CCSK [c4, c16]. D'un point de vue décodage, différents algorithmes ont été proposés : tout d'abord, l'adaptation de l'algorithme Extended Min Sum au décodeur SC (Successive Cancellation) [c13], puis l'algorithme Asymmetrical EMS [c1] et enfin, le Polarized Aware EMS (ce dernier sera décrit dans le manuscrit de thèse de Monsieur Joseph Jabour et dans un article de revue). Une des grandes surprises de cette étude a été le fait que le décodeur polaire non-binaire est finalement assez simple et surtout, pour les très faibles rendements, très efficace comparé à la version binaire.

La comparaison des codes entre deux peut se résumer de façon qualitative par la nette supériorité des turbocodes NB par rapport au NB-LDPC et NB-Polaire, la supériorité des NB-LDPC sur les NB-Polaire pour les petites tailles de code, avantage qui disparaît pour les grandes tailles de code. En termes de complexité, l'ordre est exactement inverse : les décodeurs les plus simples sont les décodeurs SC polaire non-binaire, suivis par les décodeurs NB-LDPC (facteur 2 à 5 en complexité) et enfin, les décodeurs turbocode NB avec un ordre de grandeur de complexité (la grande puissance de correction du turbocode NB a un coût). Toutefois, contrairement aux codes NB polaires et turbocodes NB, les décodeurs NB-LDPC offrent la possibilité de calculer facilement un syndrome, information qui peut être utilisée pour la synchronisation temporelle d'une trame QCSP.

Finalement, la définition des séquences C4 qui permettent de construire des séquences d'étalement CCSK gardant des propriétés de distances optimales lorsqu'elles sont tronquées a été un résultat non prévu du projet. Les séquences C4 ont donné lieu à un dépôt de brevet [b2] et à trois articles de conférence [c2, c3, c15]. Une revue IEEE est en cours de finalisation.

WP2. Détection/Synchronisation de trames QCSP

Cette étude a été réalisée dans deux directions complémentaires : dans le contexte mono-porteuse (Lab-STICC/UBS) et le contexte multi-porteuse (Orange Labs).

Pour la détection d'une trame QCSP mono-porteuse, la réception passe par différentes étapes qui permettent à chaque fois de lever une incertitude sur l'un des paramètres de la trame (temps d'arrivée, fréquence et phase résiduelle), et ce, jusqu'à permettre sa démodulation cohérente. Une fois démodulée de façon cohérente, le décodeur non-binaire est utilisé pour fournir la trame décodée. Tout commence par le filtre de détection permettant d'estimer (avec une certaine incertitude) si une trame est présente ou non. La première contribution a été de caractériser théoriquement les performances du filtre de détection (travaux qui ont donné lieu à une revue IEEE [j1] et qui sont développés dans la thèse de K. Saied [t2]). De plus, la méthode de time-sliding qui permet de tirer profit de la structure de la modulation CCSK pour effectuer la détection directement dans le domaine temporel a été proposée [c10]. Une fois détectée, le problème de synchronisation temporelle a été résolu par l'ajout d'une sur-modulation (procédé qui a été breveté [b5] et publié [c11]). La

synchronisation temporelle au niveau chip s'effectue en utilisant le syndrome du code NB-LDPC. L'estimation grossière de la fréquence résiduelle est effectuée par une méthode classique de transformée de Fourier discrète. Une méthode à maximum de vraisemblance a été proposée pour l'estimation fine de la phase et de la fréquence résiduelle [c6, c8, c9]. Cette démarche s'appuie sur une estimation a priori de la densité de probabilité de chaque symbole décodé prenant en compte des informations a priori (venant du canal) et extrinsèque (apportée par le code correcteur d'erreurs). De la définition optimale du problème d'estimation fine fréquence/phase, des algorithmes approximatifs sont dérivés.

En complément des méthodes ci-dessus, le projet QCSP a aussi proposé d'utiliser le couplage entre les propriétés de la modulation CCSK (avec une adaptation pour le symbole 0) et de la représentation en puissance de l'unité des éléments du corps de Galois pour déporter au niveau du code correcteur d'erreur le problème de la synchronisation temporelle fine de la trame. L'avantage de cette méthode (méthode brevetée [b4]) est qu'elle permet alors d'utiliser n'importe quel code correcteur d'erreur non-binaire.

Sur la partie multi-porteuses, le choix de la combinaison des modulations CCSK et CP-OFDM a été effectué afin de pouvoir également traiter les étapes d'estimation de canal et d'égalisation, et ce, sans séquence pilote. En employant une égalisation inter-symboles OFDM de la trame reçue, une matrice de shift relatifs est obtenue, constituant la base d'un algorithme de démodulation itératif performant. De nombreuses perspectives autour de l'utilisation de cette matrice et de l'amélioration de l'algorithme itératif sont proposées.

Sur les aspects détection et synchronisation temps/fréquence, des méthodes innovantes ont été mises en avant. On peut notamment relever l'utilisation astucieuse du principe de démodulation décalée, qui permet de démoduler correctement la trame CCSK si toutes les séquences sont décalées d'un shift supplémentaire constant, pour réduire les exigences de précision des synchronisations temps et fréquence.

Les techniques précédemment évoquées s'accompagnent de la définition d'un mapping dit itératif de plusieurs séquences CCSK au sein de chaque symbole OFDM, exposant des propriétés avantageuses pour l'application desdites techniques.

Toutes ces innovations ont conduit au dépôt (déjà effectués ou en cours) de 9 brevets ([b6, b7, b8, b9]) pour les quatre brevets déjà déposés, 5 autres en cours de dépôt).

WP3. Démonstrateur

Ce WP s'est divisé en deux parties. Tout d'abord, une étude d'adéquation algorithmique architecture sur les étapes de détection et de transmission de la trame QCSP a été effectuée. Ensuite, un démonstrateur temps réel et grandeur nature d'une chaîne QCSP basé sur de la radio logicielle a été conçu et mis en œuvre.

L'étude d'adéquation algorithmique architecture s'est concentrée sur la détection et l'émission de trames car ces parties de la chaîne sont celles imposant les débits et latences au sein du système global. En effet, la synchronisation n'intervient que si la détection réussie et cette dernière n'a de sens que si la transmission fonctionne.

Concernant le transmetteur, l'estimation de sa complexité et son implémentation en logiciel et en matériel sur des cibles embarquées a montré sa faible complexité. Cela a particulièrement mis en exergue la forte asymétrie de la chaîne QCSP en termes de complexité des transmetteurs comparée à celle des récepteurs.

L'étude de l'algorithme de détection a mené à une contribution déjà reporté pour le WP2, l'évolution de l'algorithme de détection (le « time sliding ») [c10]. De plus, il a été possible d'établir que, dans le contexte du projet, en mono-porteuse, les calculs requis en détection sont plus efficacement réalisés dans le domaine temporel que dans le domaine fréquentiel, domaine jusqu'alors privilégié. Ce résultat contre-intuitif est supporté autant par une approche mathématique d'estimation de complexité que quantitativement via des simulations et des benchmarks [cn1, g1].

Enfin, le raffinement des implémentations logicielles et matérielles a permis d'obtenir des résultats en termes de débits supérieurs à ceux de solutions pourtant établies comme le LoRa. Qui plus est, ces performances ont été obtenues pour une consommation énergétique contenue, compte tenu de la charge calculatoire. Les résultats en termes d'efficacité énergétiques ont été publiés et analysés dans un article de revue internationale [j2].

Enfin, un raffinement en virgule fixe de l'implémentation matérielle du détecteur a été réalisé et permet d'augmenter encore le rapport débit / consommation énergétique. Cette étude est disponible dans la thèse de Camille Monière [t1].

La partie conception et mise en œuvre du démonstrateur a représenté un intense effort d'implémentation et de coordination. À l'aide des implémentations logicielles et matérielles évoquées précédemment, du code MATLAB pour la synchronisation (fortement optimisé pour l'occasion), d'ordinateurs mono-cartes Raspberry Pi 4 et des dispositifs de radio logicielle USRP d'Ettus Research, il a été possible d'effectuer des transmissions sur quelques kilomètres en milieu réel et en temps réel. Les expériences ont permis d'une part de valider les travaux des workpackages 1 et 2, d'autre part, de servir de promotion à la technique QCSP.

C.5 EXPLOITATION DES RESULTATS

L'exploitation des résultats du projet QCSP a déjà commencé à travers deux actions avec des industriels. Tout d'abord, la société Thalos a menée 2 campagnes de mesures en mer (mobilisation d'un bateau à moteur, de matériel et de personnels de la société Thalos) pour tester des communications avec une trame QCSP entre une petite bouée conçue pour être discrète et un navire. La restitution de la deuxième campagne de mesure aura lieu fin octobre 2023. Ensuite, depuis mars 2023, l'UBS participe à un RT CNES et la société KINEIS (balise Argos). L'objectif est de tester les trames QCSP dans un contexte IoT par satellite, les résultats préliminaires sont prometteur.

Le logiciel de récepteur temps réel de trame QCSP a été développé en interne et aurait dû être mis en logiciel libre pour que la communauté scientifique et industrielle puisse reproduire et améliorer nos résultats. Toutefois, le Haut Fonctionnaire de Défense et de Sécurité (HFDS) a informé la SATT Ouest Valorisation et l'UBS que ce code relevait de la « souveraineté nationale » et **a interdit la diffusion de ce code en logiciel libre**. Pour le moment, il a déjà été partagé avec l'EPFL avec une licence spécifique.

A moyen terme, le projet ANR WARM-M2M, dont une partie est dédiée à la détection multi-utilisateurs des trames QCSP est sur liste d'attente (partenaires : NOKIA, INSA Lyon, UBS et KINEIS). Un projet PRCI 2024 est en cours de construction avec la Suisse (EPFL) sur l'application des techniques développées dans QCSP pour l'amélioration des trames LORA.

Enfin, à plus long terme, les 12 brevets déposés au cours de ce projet permettent d'ouvrir de nombreuses opportunités d'exploitation des résultats. En particulier, il faut noter qu'une option sur licence sur l'un des brevets a déjà été vendue à une société.

Du point de vue d'Orange Labs, la combinaison des modulations CCSK et CP-OFDM a amené à la création d'une grande quantité de propriété intellectuelle avec un total de 9 brevets déposés ou en cours de dépôt. Cette richesse démontre le potentiel d'une telle combinaison, avec en perspective la prochaine génération de technologies cellulaire 6G.

C.6 DISCUSSION

Les confinements dus au COVID ont incontestablement ralenti le projet à son début, toutefois, le délai supplémentaire accordé par l'ANR a permis d'absorber ce ralentissement.

C.7 CONCLUSIONS

Le projet s'est déroulé de façon très satisfaisante, avec une véritable synergie entre les partenaires. Il a évolué par rapport aux prévisions du projet initial. Tout d'abord, nos espoirs d'intégrer la solution QCSP au standard 5G ont rapidement été déçus. En effet, le 3GPP a rapidement choisi de ne pas faire de rupture technologique et de faire juste des optimisations des solutions du 4G. Néanmoins, le bilan du projet est très positif : outre le fait que des démonstrations temps réel ont validé le concept de trame QCSP, le projet a pris des directions scientifiques non-prévues et prometteuses (constellations C4, modulation CCSK-ODFM par exemple), ce qui est la marque d'un projet scientifique collaboratif réussi.

Avec les 12 brevets déposés dans le cadre de ce projet, deux campagnes de mesures avec un industriel et un contrat de recherche avec le CNES et une entreprise du domaine spatiale, le projet QCSP, outre les perspectives scientifiques ouvertes, offrent aussi de nombreuses opportunités de valorisation.

C.8 REFERENCES

Cette section ne concerne que les références non générées par le projet QCSP.

[3GPP] 5G NR, Multiplexing and channel coding, 3GPP TS 38.212, V15.2.0 (Release 15), August 2018.

[ABA13] O. Abassi, L. Conde-Canencia, M. Mansour, and E. Boutillon, "Non-binary coded CCSK and Frequency-Domain Equalization with simplified LLR generation", IEEE PIMRC, London, 2013.

[ABA14] O. Abassi, "Etude des décodeurs LDPC non-binaires", PhD report, UBS, June 2014. [DUR16] G. Durisi, T. Koch and P. Popovski, "Toward Massive, Ultrareliable, and Low-Latency Wireless communication With Short Packets," Proceedings of the IEEE, vol. 104, no. 9, pp. 1711-1726, Sept. 2016.

[GAD18] R. Garzon Bohorquez, C. Abdel Nour, C. Douillard, « Protograph-Based Interleavers for Punctured Turbo Codes », IEEE Transactions on Communications, 2018, 66 (5), pp.1833-1844 [GSM] "Extended Coverage - GSM – Internet of Things (EC-GSM-IoT) | Internet of Things." [Online] <https://www.gsma.com/iot/extended-coverage-gsm-internet-of-things-ec-gsm-iot/>.

[KADF18] R. Klaimi, C. Abdel Nour, C. Douillard, J. Farah, « Design of Low-Complexity Convolutional Codes over GF(q) », GLOBECOM 2018 : IEEE Global Communications Conference, Dec 2018, Abu Dhabi, United Arab Emirates

[LABD20] V. H. S. Le, C. Abdel Nour, E. Boutillon, C. Douillard, « Revisiting the Max-Log-Map algorithm with SOVA updates rules: new simplifications for high-radix SISO decoders », IEEE Transactions on Communications, 2020, 68 (4), pp.1991-2004.

[LORA] Lora-Alliance, "LoRaWAN TM 101 A Technical Introduction." [Online]. Available: www.lora-alliance.org .

[SIGFOX] "Sigfox Technology Overview | Sigfox." [Online]. <https://www.sigfox.com/en/sigfox-iot-technology-overview> [3GPP-TS-36.211] LTE Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Physical Channels and Modulation. 3GPP TS 36.211, V13.2.0 (Release 13), August 2016.

D LISTE DES LIVRABLES

Date de livraison	N° Deliv-er-able	Titre	Nature	Partenaires	Commentaires
11/19	1.1	Specification of code parameters and performance requirements	Rapport	CEA	Rapport disponible online
10/20	1.2a	Design of low rate NB-codes Rapport	Rapport	Lab-STICC CEA, IMTA	Rapport disponible
	1.2b	Design of low rate NB-codes	Rapport	IMTA	Tâche annulée
3/21	1.3	Decoding algorithms, performance and complexity considerations	Rapport	ETIS	Rapport disponible online
	1.4	Comparison and validation of the proposed solutions	Rapport	CEA	Tâche annulée
10/20	2.1	Specification of the spreading sequence.	Rapport	UBS	Rapport disponible online
10/20	2.2a	Specification of detection algorithm.	Rapport, logiciel	UBS	Rapport disponible online
3/22	2.2b	Specification of detection algorithm.	Rapport, logiciel	UBS	Rapport de thèse de K. Saeid.
11/20	2.3a	Specification of synchronization algorithm	Rapport, logiciel	UBS	Rapport disponible online

Date de livraison	N° Deliv- rable	Titre	Nature	Partenaires	Commentaires
3/22	2.3b	Specification of synchronization algorithm	Rapport	UBS	Rapport de thèse de K. Saeid.
01/23	2.4	Decoding algorithms, performance and complexity considerations	Rapport	IMS, UBS	Rapport de thèse de C. Monière.
9/23	2.5a	3GPP use cases: elaboration and study	Rapport	Orange Labs	Tâche ajoutée Diffusion après protection.
9/23	2.5b	Study of CCSK-OFDM	Rapport	Orange Labs	Tâche ajoutée Diffusion après protection.
	3.1	Offline link	Rapport + Logiciel	UBS	Tâche Annulée
01/23	3.2	Real Time Platform	Rapport + logiciel	IMS, UBS	Rapport de thèse de C. Monière.
	3.3	Integration of CCSK-NB code in Open Air Interface	Rapport + logiciel	Orange Labs	Tâche Annulée
9/23	4.1a	Scientific dissemination	Site WEB	UBS	Site actif
9/23	4.1b	Scientific dissemination	Rapport	UBS	Voir rubrique event site WEB
	4.2a	Standardisation	Rapport	Orange Labs	Tâche Annulé
	4.2b	Standardisation	Rapport	Sequans	Tâche annulée

E IMPACT DU PROJET

E.1 INDICATEURS D'IMPACT

Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)

		Publications multipartenaires	Publications monopartenaires
International	Revue à comité de lecture	2	
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	8	8
France	Revue à comité de lecture		
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	1	
Actions de diffusion	Articles vulgarisation		
	Conférences vulgarisation	1	
	Autres		

Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
Brevets internationaux obtenus	3
Brevet internationaux en cours d'obtention	
Brevets nationaux obtenus	2
Brevet nationaux en cours d'obtention	9
Licences d'exploitation (obtention / cession)	
Créations d'entreprises ou essaimage	
Nouveaux projets collaboratifs	Projet de recherche collaboration avec KINEIS et le CNES pour évaluer la forme d'onde QCSP pour des communications spatiales (65 keuros pour l'UBS).
Colloques scientifiques	Co-organisateur journée GDR-ISIS "Short packet transmission for wireless communications"» du 24 September 2021.
Autres (préciser)	

E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Revues internationales

[j1] K. Saied, A. Chamas Al Ghouwayel, E. Boutillon, "Short Frame Transmission at Very Low SNR by Associating CCSK Modulation with NB-Code", IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21 (9), pp.7194-7206.

[j2] C. Monière, B. Le Gal, E. Boutillon. "Real-time energy-efficient software and hardware implementations of a QCSP communication system". Journal of Systems Architecture, 102933, 2023.

Conférences internationales

[c1] J. Jabour, A. Al Ghouwayel, E. Boutillon, "Asymmetrical Extended Min-Sum for Successive Cancellation Decoding of Non-Binary Polar Codes", 12th International Symposium on Topics in Coding (ISTC 2023), Sep 2023, Brest, France.

[c2] E. Boutillon, "C4-Sequences: Rate Adaptive Coded Modulation for Few Bits Message", 12th International Symposium on Topics in Coding (ISTC 2023), IEEE, Sep 2023, Brest, France.

[c3] C. Marchand, A. Olteanu, E. Boutillon, "Rate-Adaptive Cyclic Complex Spreading Sequence for Non-Binary Decoders", 12th International Symposium on Topics in Coding (ISTC 2023), IEEE, Sep 2023, Brest, France.

[c4] F. Cochachin, F. Ghaffari, "A Lightweight Encoder and Decoder for Non-Binary Polar Codes", The 22nd International Conference on Wireless Networks (ICWN'23: July 24-27, 2023; Las Vegas, USA),

[c5] J. Jabour, C. Marchand, E. Boutillon, "The Best, The Requested, and The Default Non-Binary LDPC Decoding Algorithm", IEEE Wireless Communications and Networking Conference, IEEE, Mar 2023, Glasgow, United Kingdom.

[c6] K. Saied, L. Enrique Camacho Flores, E. Boutillon, "Weighted Coherent Detection of QCSP frames", IEEE Wireless Communications and Networking Conference, IEEE, Mar 2023, Glasgow, United Kingdom.

[c7] R. Klaimi, S. Weithoffer, C. Abdel Nour, "Improved Non-Uniform Constellations for Non-Binary Codes Through Deep Reinforcement Learning," SPAWC 2022: IEEE 23rd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communication, Jul 2022, Oulu, Finland.

- [c8] K. Saied, A. Chamas Al Ghouwayel, E. Boutillon, "Phase Synchronization for Non-Binary Coded CCSK Short Frames", 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Spring), Jun 2022, Helsinki, France.
- [c9] K. Saied, A. Al Ghouwayel, E. Boutillon, "Phase Synchronization for Non-Binary Coded CCSK Short Frames", IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022), IEEE, Jun 2022, Helsinki, Finland.
- [c10] C. Monière, Kassem Saied, Bertrand Le Gal, E. Boutillon, "Time sliding window for the detection of CCSK frames", IEEE Workshop on Signal Processing Systems (SiPS'2021), Oct 2021, Combría, Portugal.
- [c11] K. Saied, A. Ghouwayel, E. Boutillon, "Time-Synchronization of CCSK Short Frames", 17th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob'2021), Oct 2021, Bologna, Italy.
- [c12] J. Jabour, C. Marchand, E. Boutillon, "The Best, The Requested, and The Default Non-Binary LDPC Decoding Algorithm", IEEE 11th International Symposium on Topics in Coding (ISTC'2021), Aug. 2021, Montréal, Canada.
- [c13] F. Cochachin, L. Luzzi, F. Ghaffari, "Reduced Complexity of a Successive Cancellation Based Decoder for NB-Polar Codes", 2021 11th International Symposium on Topics in Coding (ISTC'2021), Aug. 2021, Montreal, Canada.
- [c14] H. Le Blevec, R. Klaimi, S. Weithoffer, C. Abdel Nour, A. Baghdadi, "Low Complexity Non-binary Turbo Decoding based on the Local-SOVA Algorithm", ISTC 2021: 11th International Symposium on Topics in Coding (ISTC'2021), Aug. 2021, Montreal, Canada.
- [c15] C. Marchand, E. Boutillon, "Rate-adaptive Inner Code for Non-Binary Decoders", IEEE 11th International Symposium on Topics in Coding (ISTC'2021), Aug. 2021, Montreal, Canada.
- [c16] V. Savin "Non-Binary Polar Codes for Spread-Spectrum Modulations", 2021 11th International Symposium on Topics in Coding (ISTC'2021), Aug. 2021, Montreal, Canada.

Thèses de doctorat

- [t1] C. Monière, "Real-Time implementation of Quasi-Cyclic Short Packet Receiver", Electronics. Université de Bretagne-Sud, 2023. English.
- [t2] K. Kassem, "Quasi-Cyclic Short Packet (QCSP) Transmission for IoT", Networking and Internet Architecture. Université Bretagne Sud, 2022. English.

Conférences Nationales

- [cn1] C. Monière, Bertrand Le Gal, E. Boutillon, "Implémentations logicielles et matérielles efficaces d'une chaîne de communications QCSP", Conférence francophone d'informatique en Parallélisme, Architecture et Système, compAS'2022, Jul 2022, Amiens, France.

Posters

- [p1] C. Monière, Bertrand Le Gal, E. Boutillon, "Real-Time QCSP Communication System Prototyping", Colloque GDR SoC², 2022, Strasbourg, France.

E.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

- [b1] KLAIMI Rami, ABDEL NOUR Charbel, DOUILLARD Catherine, "Poinçonnage sélectif des codes non binaires", brevet EP4128543A1, publié le 08/02/2023.
- [b2] MARCHAND Cédric, BOUTILLON Emmanuel, "Procédé de génération d'un signal, procédé de construction d'une séquence de base, dispositif et programme d'ordinateur correspondants, demande de brevet FR2300964, date de dépôt : 02/02/2023.
- [b3] BOUTILLON Emmanuel, JABOUR Joseph, MARCHAND Cédric "A method for decoding a codeword encoded using a non-binary code, corresponding device and

computer program", demande de brevet EP21306162.5, date de demande 27/08/2021/
[b4] BOUTILLON Emmanuel, SAVIN Valentin, "Procédés et dispositifs de transmission et de réception de mots de code correcteur d'erreur non binaire ", demande de brevet FR2114346, date de dépôt : 23/12/2021.

[b5] SAIED Kassem, BOUTILLON Emmanuel, "A method for a transmitter to transmit a signal to a receiver in a communication system, and corresponding receiving method, transmitter, receiver and computer program", demande de brevet EP21306419.9, date de dépôt : 08/10/2021/

[b6] Louis-Adrien Dufrène, Quentin Lampin, « Positionnement itératif pour modulations CCSK et CP-OFDM », demande de brevet français FR2306539, 22/06/2023.

[b7] Louis-Adrien Dufrène, Quentin Lampin, « DFT Link : méthode d'estimation de canal et d'égalisation sans pilote », demande de brevet français FR2306540, 22/06/2023.

[b8] Louis-Adrien Dufrène, Quentin Lampin, « Positionnement des zéros pour modulation CCSK », demande de brevet français FR2306541, 22/06/2023.

[b9] Louis-Adrien Dufrène, Quentin Lampin, « Recouvrement temporel pour isoler les groupes de transmission en CP-OFDM », demande de brevet français FR2306544, 22/06/2023.

Cinq autres demandes de brevets en cours de rédaction par Orange Labs.

Comme déjà indiqué, la diffusion en logiciel libre du logiciel du récepteur temps réel de trames QCSP est bloquée par le HFDS. Pour le moment, il a déjà été uniquement partagé avec l'EPFL avec une licence spécifique.

Le projet QCSP a donné lieu à une action de recherche thématique entre le CNES et la société KINEIS pour étudier l'utilisation de trame QCSP pour communiquer avec des satellites LEO. Si cette étude confirme le potentiel des trames QCSP, d'autres contrats suivront pour accompagner le développement industriel de cette technologie.

Enfin, la société Thalos souhaitant évaluer la technologie pour ses besoins spécifiques de transmission maritime, l'UBS et Thalos ont mené deux campagnes de mesure en mer (voir plus de détails sur le site WEB de QCSP, dans la rubrique « event »).

E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
Camille MONIERE	H	Camille.monière@univ-ubs.fr		Ingénieur	ENSEIRB-MATMECA (France)		UBS	Doctorant	36	01/2023	MdC	enseignement et recherche publique	Fonctionnaire stagiaire.	Oui	Oui
Alireza TASDIGHI	H	alireza.tasdighi <ar.tasdighi@gmail.com>		Doctorat	Iran (Hors UE)	2 ans	UBS	IGR	2	04/2020	Post-Doc	enseignement et recherche publique	CDD	Non	
Cédric MARCHAND	H	Cedric.marchand@univ-ubs.fr		Doctorat	UBS (France)	10 ans	UBS	IGR	5	10/2020	IGR	enseignement et recherche publique	CDI (loi Sapin)	Oui	Oui
Mohammed KERNACHE	H	mohammed.beyahmedkhernache@univ-ubs.fr		Master	UBO (France)		UBS	IGE	3	01/2021					
Kassem SAIED	H	Kassem.saied@univ-ubs.fr		Master	Université de Beyrouth (Hors UE)		UBS	IGE	2	04/2021	Post-Doc	enseignement et recherche publique	CDD	Oui	Oui
Rami KLAIMI	H	Rami.klaimi@imt-atlantique.fr		Doctorat	IMTA (France)		IMTA	Postdoc	7	05/2022	IGR	PME/TPE	CDI	Oui	Non
Kassem SAIED	H	Kassem.saied@imt-atlantique.fr		Doctorat	UBS (France)		IMTA	Postdoc	6	12/2022	Post-Doc	enseignement et recherche publique	CDD	Oui	Oui
Florian LOUPIAS	H	Florian.Loupias@bordeaux-inp.fr		Master	ENSEIRB-MATMECA (France)		IMS	IGE	6	02/2020					

Oussama AIT SIDI ALI	H	aitsidialio ussama@ outlook.fr		Master	ENSEIRB- MATMECA (France)		IMS	IGE	6	02/2020					
Franklin Rafael Cochachi n Henostro za	H	franklin- rafael.coc hachin- henostro za@ensea.f r		Doctorat	CY & UBS (France)	3 ans	ETIS	Postdoc	12	07/2020					