

NFC

NEAR FIELD COMMUNICATION

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



**Dominique Paret
Xavier Boutonnier
Youssef Houiti**

NFC

NEAR FIELD COMMUNICATION

**Principes et applications
de la communication
en champ propre**

DUNOD

Illustration de couverture : © Jean-Paul Huon

Illustrations intérieures : Ursula Bouteville

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2012
ISBN 978-2-10-055989-3

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	XI
--------------	----

A

Introduction et genèse du NFC

1 • En attendant le NFC...	3
1.1 Rappel historique	3
1.2 Position générale d'une nouvelle technologie	4
1.3 État de l'existant en <i>contactless</i>	4
1.4 Interopérabilités et normes	5
1.5 Tests de conformités hardware et software	5
2 • Communications en radiofréquences et NFC	7
2.1 Les bases physiques du <i>contactless</i> et du NFC	7
2.2 Les contraintes génériques habituelles	16
2.3 Les applications du marché RF des SRD	26
3 • L'existant et l'héritage de l'existant	29
3.1 Rappels sémantiques	29
3.2 L'existant	37
3.3 L'héritage de l'existant	41
4 • Autres possibilités de communication en champ proche	75
4.1 Les différentes technologies de communication en champ proche	75
4.2 Avant-hier et hier	75
4.3 Bluetooth	76

4.4	Bluetooth Low Energy (Bluetooth LE)	78
4.5	BlueNFC	80
4.6	ZigBee	80
4.7	WUSB – Wireless USB	82
4.8	Memory-Spot	83
4.9	TransferJet	85
4.10	Demain matin et après-demain	87

B

Le concept NFC : description technique

5 • Les prémices du NFC	91
5.1 L'existence des premiers déploiements du <i>contactless</i>	91
5.2 Attentes du marché et/ou possibilités de nouvelles technologies	92
5.3 Principes techniques généraux de cette nouvelle technologie	93
5.4 Faire-part de naissance : un peu d'histoire ne fait jamais de mal à personne	96
6 • ECMA 340 NFC IP1 et 352 NFC IP2	101
6.1 Descriptions techniques des NFC – IPx	101
6.2 Positionnement des NFC IP1 & IP2 dans le modèle OSI	101
6.3 Couches basses – couche 1 – couche physique	106
6.4 Couches basses – couche 2 – <i>data link</i>	116
7 • Sécurité du NFC	121
7.1 Sécurité générique de la couche physique	121
Conclusion de la seconde partie	124

C

Le « NFC Forum »

8 • NFC Forum – généralités	127
8.1 Introduction au NFC Forum	127
8.2 Pourquoi le NFC Forum ?	127
8.3 Où se situe le NFC Forum dans le concept NFC ? Pourquoi ? Pour qui ?	128
8.4 Qui en fait partie ?	129

8.5	Où se situe le NFC Forum dans le concept NFC ? Dans quel but ?	131
8.6	Vue globale de la proposition technique du NFC Forum	132
8.7	Les spécifications externes du NFC Forum	133
8.8	Les principales spécifications techniques	135
8.9	Résumé de l'architecture technique du NFC Forum	137
8.10	Vocabulaire et définitions	138
9	• NFC Forum – Couches basses	141
9.1	Héritage	141
9.2	Technologies	142
9.3	NFC Forum Devices et NFC Forum Tags	146
9.4	Mode/Rôle	147
9.5	Communication entre NFC Forum Devices	150
10	• NFC Forum – Couches hautes	157
10.1	Le protocole de communication de haut niveau	157
10.2	Les protocoles de communication pour les échanges de données	171

D

Interopérabilités, conformités, tests et outils

11	• Interopérabilité et conformité	211
11.1	Le problème de l'interopérabilité entre systèmes	211
11.2	Interopérable par rapport à soi-même et avec d'autres	212
11.3	Conformité, certification, homologation... et publicité mensongère	213
12	• « Conformance tests », hardware et software	215
12.1	Liste des normes et standards de conformance	216
12.2	Normes de tests de « conformances » ECMA et ISO pour NFC IPx	217
12.3	Tests de conformances du NFC Forum	220
12.4	Méthodes de tests et certifications au NFC Forum	222
13	• Les outils de mesure pour les tests de conformités aux normes	227
13.1	Micropross	227
13.2	FIME	229
13.3	Outils de mesure pour les tests de conformités NFC Forum	229

E**Le champ des applications du NFC**

14 • Le champ générique des applications NFC	233
14.1 Le large éventail des possibilités applicatives	233
14.2 Événail des possibilités techniques	235
15 • Segmentation, typologies des marchés, problèmes, incidences et conséquences techniques directes	239
15.1 Les segments et typologies de marché	239
16 • Intégration du NFC dans la téléphonie mobile	263
16.1 Exemple d'intégration et de mise en œuvre d'une architecture du NFC dans la téléphonie mobile	263

F**Les composants et les antennes NFC**

17 • Les composants du marché	279
17.1 Survol du marché	279
17.2 Les circuits intégrés du marché	279
17.3 Les tags NFC	289
18 • Les antennes, leurs environnements, leurs implémentations et les NFC devices	299
18.1 Couplage magnétique... et ses conséquences	300
18.2 <i>Loading effect</i> (à ne surtout pas confondre avec la <i>load modulation</i> !)	301
18.3 Performances requises par la base station	302
18.4 Étude détaillée du <i>loading effect</i>	305
18.5 Et le circuit de « shunt » ? Quelle résistance ?	323
18.6 Les solutions classiques d'antennes	336

G

Le futur « proche » et « lointain » du NFC

19 • La suite : NFC et ses relations ISO avec les cartes à puces, la téléphonie mobile, la RFID et les mobiles RFID	343
19.1 NFC et cartes à puces	343
avec les cartes à puces, ...	343
19.2 NFC et téléphonie mobile	345
19.3 NFC, la « RFID » en HF... et en UHF	351
19.4 Convergence NFC HF/UHF ?	357
20 • Conclusion	361

Annexes

Annexe 1 • Rappels sur les équations de Maxwell	365
Annexe 2 • Passage des normes ECMA à l'ISO	368
2.1 ISO SC17/CN17 – SC 06 vs fast track et ECMA... et NFC	368
2.2 Résumé normatif du NFC à l'ECMA et à l'ISO	369
2.3 Tableau des équivalences ECMA/ISO	370
2.4 Histoire du conte de la fée « C »... (voir chapitre 3)	370
Annexe 3	372
3.1 « NFC normes & standards », smartcard contactless, RFID et mobile NFC stories...	372
Index	375

AVANT-PROPOS

Après le succès mondial des premières technologies sans contact (cartes à puces sans contact, RFID...) nous voyons aujourd'hui s'imposer la technique « Near Field Communication – NFC », technologie de communication de proximité qui constitue une suite logique aux étapes précédentes. Comme vous le découvrirez tout au long de cet ouvrage, les applications et les usages des techniques NFC vont de l'échange d'informations dématérialisées au paiement sécurisé et contrôlé via un équipement de poche (téléphone mobile, appareil photo).

À ce jour peu d'informations et peu de formations techniques sont disponibles pour les ingénieurs, les techniciens ou les étudiants. La particularité de cet ouvrage est de ne pas être un « fourre-tout » sur le sujet (contrairement à certains séminaires auxquels nous avons participé), mais plutôt une référence technique (hardware et un peu software) permettant d'appréhender en profondeur tous les détails « métiers » et toutes les problématiques fonctionnelles et applicatives afférents à cette technologie.

Nous avons cherché à construire la synthèse la plus complète et la plus à jour (à un instant *t*) concernant ce domaine en pleine évolution, notamment grâce à des introductions historiques (souvent utiles pour comprendre...) et à des « décryptages » techniques sur ces sujets.

Aujourd'hui, cet ouvrage dédié au NFC est dense dans le sens où la quasi-totalité des sujets (principes, fonctionnement détaillé de la couche physique, contenus des normes ECMA/ISO/ETSI, propositions du NFC Forum, composants, applications, sécurité, implémentations dans un *device* NFC...) sont abordés de façon concrète. Par ailleurs, afin de ne pas rebuter le lecteur dans sa compréhension des dispositifs présentés, nous avons cherché à faire aussi souvent que possible des liaisons entre théorie, mises en œuvre technologiques, aspects économiques, etc.

À ce jour, alors que les dispositifs NFC arrivent à peine sur le marché, on parle déjà « d'écosystème ». Bien sûr, c'est un argument de développement important... mais il en faut bien d'autres, notamment le fait que les dispositifs NFC soient techniquement interopérables non seulement entre eux mais aussi avec les produits déjà existants, et qu'ils sachent se libérer ou se concilier avec les environnements matériels dans lesquels ils sont baignés. Ceci peut être résumé par la remarque suivante : « *ce n'est pas la peine de vanter les mérites d'un logiciel, aussi performant soit-il, si la carte mère ne fonctionne pas* » !...autre version de « *on ne met pas la charrue avant les bœufs !* ».

Dernier point à noter, cet ouvrage n'est pas la traduction littérale des normes ECMA, ISO, NFC Forum que chacun d'entre vous peut trouver « gratuitement » mais, il a pour but d'une part, de servir d'introduction et de présentation détaillée et pédagogique aux principes et fonctionnements techniques du NFC et, d'autre part, de donner des vues conceptuelles et applicatives globales à ceux qui entrent dans ce domaine.

Quelques conseils pour circuler dans cet ouvrage

Les objectifs visés par le NFC (facilité, rapidité, sécurité de communication, souplesse de fonctionnement...), oblige à concevoir la structure du protocole de communication en relation directe avec les performances physiques de la couche physique. Apprenez donc dès à présent à toujours garder en tête les soucis que peut apporter la couche physique (le médium et sa gestion).

Le contenu du (ou des) protocole(s) « NFC » est dense et comporte de nombreuses notions techniques qui s'entrechoquent, ce qui nous a posé quelques problèmes dans le choix d'un plan pour enchaîner les différents chapitres. Nous espérons, après de longues réflexions et discussions, être parvenu à vous présenter l'ensemble de la façon la plus adaptée et la plus limpide possible.

Le découpage de la table des matières donne le canevas du chemin à parcourir pour avoir une vue saine du NFC et de l'état de l'art environnant.

NOTE TRÈS IMPORTANTE

Nous désirons attirer l'attention des lecteurs sur le fait que cet ouvrage décrit de très nombreux principes techniques qui, soit ont été brevetés et sont donc soumis à l'exploitation de licences et de droits associés (codages bit, techniques de communication, etc.), soit ont été publiés au sein de textes ou communications techniques professionnelles officielles, soit ont été présentés lors de conférences ou séminaires publics et doivent par conséquent être cités ou utilisés selon les règles légales en vigueur.

Nous vous souhaitons une bonne et fructueuse lecture tout au long des pages de cet ouvrage. Vous serez toujours les bienvenus pour tous commentaires, remarques, questions... (constructifs) concernant le fond et la forme de cet ouvrage par e-mail à « dp-consulting@orange.fr ».

Remerciements

La branche des systèmes sans contact (cartes à puces, RFID, réseaux de capteurs, NFC en HF et UHF, géo localisation, etc.) s'agrandit de jour en jour et beaucoup de personnes compétentes travaillent dans ces domaines. Par chance, nous avons eu l'occasion de croiser fréquemment nombre d'entre elles. Nous tenons à remercier de nombreux collègues et amis de Mikron, Philips, NXP Semiconductors de Graz (en Autriche), et particulièrement MM Stephan Poch, Holger Kunkat, Reinhard

Meindl, Franz Antmann, de Hambourg en Allemagne et de Monza en Italie, avec lesquels nous avons eu le plaisir de travailler durant de longues années sur ces sujets. Nous serions ingrats de ne pas remercier également les nombreux collègues de la profession et amis internationaux de longues dates dans ce domaine rencontrés régulièrement soit lors de réunions de travail des SC17, SC06, SC31 de l'ISO et de leurs commissions « miroirs » à l'AFNOR pour leurs remarques et commentaires. Par ailleurs, nous tenons également à adresser quelques remerciements spécifiques à plusieurs personnes pour leur aide. Il s'agit de MM. Jacques Reberga (NXP), Éric Nizard (L'informatique communicante -LIC), Johann Dantant (Proactive), Cyril Deflesselles (Ingelis), Pierre Crego (Mercury), Olivier Levy (StrapMedia), Éric Devoyon & Jean-Yves Cadorel (CRESITT).

Je tiens à remercier spécialement les deux valeureux professionnels, spécialistes et courageux amis **Xavier Boutonnier*** et **Youssef Houiti**** qui ont souhaité et osé se lancer dans l'aventure rédactionnelle de cet ouvrage avec moi et qui ont participé et collaboré grandement à la rédaction de nombreux chapitres. Que ce premier essai leur donne le goût de partager leur savoir comme j'ai commencé à le faire il y a longtemps et, qui sait, leur serve un jour de pied à l'étrier pour de nouvelles aventures livresques !

Encore un très grand merci à chacun d'entre vous pour vos contributions et votre fidèle amitié.

Dominique Paret

* M. Xavier Boutonnier – Ingénieur ENSEEIHT, à Toulouse – responsable de l'activité de l'élaboration de programmes de tests chez la Société LIC – L'Informatique Communicante - dirigée par M. Eric Nizard, qui est par ailleurs Président de l'association EESTEL - Experts Européens Transactions Electroniques Sécurisées.

** M. Youssef Houiti – Ingénieur ENSEEIHT, à Toulouse – responsable des projets clients Cartes à Puces en Europe chez NXP Semiconductors. Youssef est également membre du comité miroir de la SC17 WG8 de l'ISO à l'AFNOR en charge des cartes à puces sans contact et de l'harmonisation avec les normes NFC.

A

Introduction et genèse du NFC

Cette première partie de l'ouvrage a pour mission d'expliquer la genèse du *Near Field Communication* (NFC) et les problèmes connexes directement associés. En effet, sa naissance n'a pas été fortuite et fut le fruit d'un faisceau concordant d'idée ou de suites d'idées. Bien que cette partie soit une introduction, elle contient de nombreux faits historiques qu'il est important de connaître pour pouvoir goûter à sa juste valeur les problèmes applicatifs d'aujourd'hui et de demain. Nous vous laissons maintenant découvrir tout cela.

1.1 Rappel historique

Afin de resituer l'arrivée du concept NFC dans son contexte, en guise d'introduction à cet ouvrage, nous vous offrons un mini-rappel historique qui, comme vous le verrez tout au long des chapitres, a eu un très large impact sur le cours de l'évolution du NFC.

Nous sommes en France, au milieu des années 1970. Roland Moreno (créateur par la suite de la société RMT) et Michel Hugon de la société BULL déposent leurs brevets sur les « cartes à puce » (respectivement en mars 1974 et mars 1975), puis à nouveau Michel Ugon (août 1977 et août 1978) et enfin Louis Guillou (du SEPT France Telecom) dépose le sien en 1979. Les grandes bases techniques de la **carte à puce à contact** actuelle étaient alors posées.

Les premiers circuits intégrés pour cartes à puce à contact arrivèrent sur le marché au milieu de l'année 1979, en provenance de CII-Honeywell Bull et de Motorola, sous la forme de deux puces séparées, d'une part une mémoire EPROM de type « 2716 » et d'autre part un microprocesseur 8 bits « 3870 ». Deux ans plus tard, en 1981, arriva une puce monolithique, toujours en provenance de CII-Honeywell Bull et Motorola, la « SPOM » – Self Programmable One chip Micro computer.

Le marché et les applications étant naissantes, après de longues discussions de normalisation à l'Afnor (la carte étant d'origine française) et à l'ISO (dans son Sous-Comité SC17), la grande famille de normes internationales ISO 7816 – x dédiées aux **cartes à puces** à contact commença à apparaître et à fleurir en 1987.

Puis, courant 1988, les premières spécifications de la carte SIM furent écrites alors que Marc Lassus – après des passages successifs chez Motorola, Matra Harris et ST – créait la société GEMPLUS. Le grand spectacle auquel participèrent par la suite G&D, Schlumberger, Oberthur, etc., pouvait alors vraiment commencer.

En 1987 fut fondée à Gratkorn, près de Graz en Autriche, la société Mikron. Elle développa et produisit des **puces** et des **systèmes sans contact passifs**, fonctionnant sans batterie, par télé-alimentation, à 125 kHz et aussi bien packagées sous forme de tags qu'en cartes à puce de format normalisé « ID1 ».

Quelques années plus tard et deux ans après sa création, en 1992, la société LEGIC (en Suisse) fut le premier à introduire une « secure smart card technology platform » sans contact pour des applications de contrôle d'accès et/ou d'identification fonctionnant à la fréquence de 13,56 MHz.

En 1992-1994, la société Mikron développa et introduisit un produit baptisé « MiFare » – pour « Mikron FARE-collection system » – carte à puce sans contact multi-applications ayant un Kilooctet de mémoire. Quelques années plus tard, en 1998, Mikron fut acquise par Philips Semiconductors, devenu depuis NXP, qui déploya et commercialisa alors mondialement les produits dérivés de la famille MiFare.

1.2 Position générale d'une nouvelle technologie

Vers 1999-2000, avec l'introduction des premiers circuits intégrés dédiés aux bases stations/lecteurs de cartes à puce sans contact à des coûts vraiment industriels (notamment et principalement le circuit « MF RC 500 »), les développeurs eurent de nouvelles idées applicatives, notamment celles de faire communiquer ensemble deux bases stations pour échanger mutuellement des informations. Or, à l'époque, les réalisations technologiques ne permettaient pas de résoudre tous les problèmes afférents à cette demande.

Avant d'envisager la réponse à cette demande, faisons un état de l'existant à cette époque.

1.3 État de l'existant en *contactless*

La figure 1.1 donne la taille et la répartition du parc déjà installé en *contactless* (cartes à puce sans contact) – hors RFID qui balbutiait – vers 1999-2000.

- Hors ISO	SONY FeliCa	30 M	9 %		9 %
- ISO 14 443 B		8 M	2 %	Total B =	2 %
- ISO 14 443 A	MiFare Class.	263 M	81 %		
	MiFare ProX	22 M	8 %	Total A =	89 %

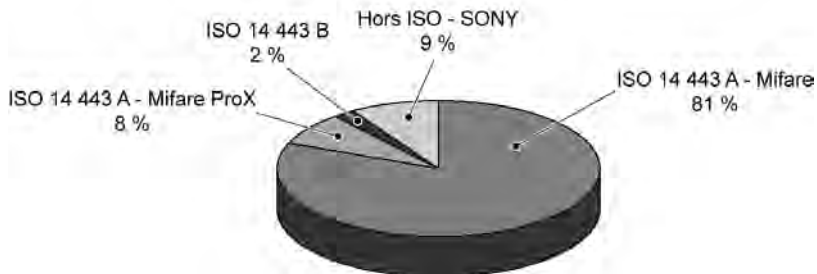


Figure 1.1 – Smart cards contactés (Frost & Sullivan).

À noter qu'en 2010, la répartition globale n'a que peu changé. À ce jour, uniquement pour la société NXP, la technologie MiFare dépasse les trois milliards et demi de circuits intégrés vendus et plus de quarante millions de circuits de bases stations sont en place. Cela donne une idée concrète du parc existant – sur lequel on peut lorgner pour de nouvelles applications. On risque de le manquer si l'on n'est pas

totalemment interopérable ou conforme. Cela donne aussi une idée de la dimension monétaire de l'opération de *retro fit* à effectuer si l'on veut le changer.

Tableau 1.1

	Puces MiFare (milliards)	Lecteurs MiFare (millions)	Puces FeliCa (millions)	Sources
Fin 2006	1,2	7	170 (30 téléphones portables)	O'Connor
Fin 2009	2,2	12	250	
Fin 2010	3,5	40		MiFare.net/Sony

1.4 Interopérabilités et normes

La force de la carte à puce, d'où son succès, réside dans son interopérabilité. Celle-ci peut se résumer aux deux principes suivants :

- **1. Tous les lecteurs peuvent lire une carte particulière.**
- **2. Toutes les cartes peuvent être lues par un lecteur particulier.**

En lisant ces lignes, il ne faut pas oublier que tout cela n'est dû qu'à une volonté farouche des participants de l'Afnor/ISO, qui ont mis en place la famille de normes ISO 7816 – x pour assurer cette interopérabilité des cartes à contact. Il en est de même pour sa sœur cadette la carte à puce sans contact (la famille de normes ISO 14 443).

Pour prétendre au même succès, le « NFC » doit tendre vers cette interopérabilité, et ce malgré l'extrême diversité des applications et des acteurs du secteur. C'est seulement à cette condition qu'il pourra perdurer et proposer des recouvrements avec des applications conformes aux normes citées ci-dessus.

Cela amène directement à un point dur de l'histoire.

1.5 Tests de conformités hardware et software

Pour être interopérable, il faut être totalement conforme à des normes et pour être conforme à celles-ci, il faut passer des tests de conformité, et surtout les réussir !

Nous reviendrons très longuement là-dessus plus tard. Pour le moment, disons simplement que, pour que ces tests existent, il faut des outils de tests qui soient représentatifs des applications. Or, comme vous le découvrirez par la suite, elles sont très nombreuses et surtout très variées, ce qui ne simplifie pas les définitions des outils de tests et les procédures de mesures à options plus que multiples, tant au niveau hardware (couches basses) que software (couches hautes) du modèle OSI.

Par ailleurs, pour effectuer ces tests, il faut que des laboratoires indépendants existent (et non pas « plus ou moins indépendants ») et qu'ils ne soient pas simultanément juges et partis ! C'est si simple de s'homologuer tout seul dans son coin

et de se mettre un tampon et un joli logo ! Nous y reviendrons très longuement au chapitre 12.

Bref, vous voici entrés dans la jungle du NFC (voir figure 1.2).

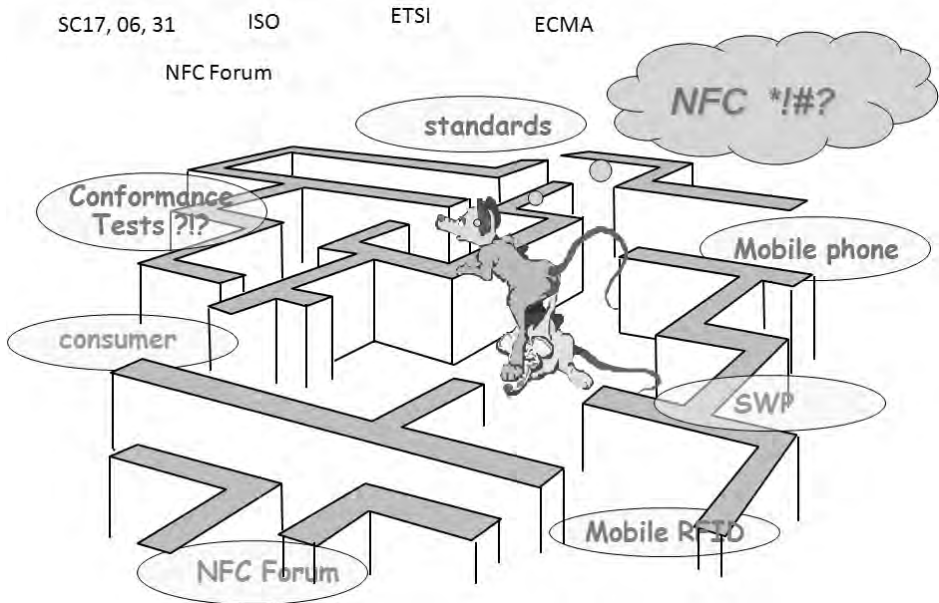


Figure 1.2

2 • COMMUNICATIONS EN RADIOFRÉQUENCES ET NFC

À tous ceux qui sont éloignés de la technique (ou qui l'ont un peu oubliée), nous proposons au cours de la première partie de ce chapitre une petite remise à jour concernant d'une part les communications en radiofréquences et d'autre part la signification exacte de la notion et du terme de Communication en champ proche, en anglais *Near Field Communication* (NFC). C'est de la physique, ce n'est pas du marketing !

De plus, n'étant pas les seuls sur la planète à utiliser les communications en radiofréquences, nous sommes bien obligés de nous entendre avec nos voisins pour ne pas nous gêner mutuellement. Pour cela, la seconde partie du chapitre évoquera quelques-unes des nombreuses contraintes qui ont été élaborées par les gouvernements et instances de tutelle. Les paragraphes suivants auront pour but de passer en revue celles qui vont nous encadrer.

2.1 Les bases physiques du *contactless* et du NFC

Avant d'aller un peu plus loin et pour éviter de dire des bêtises au sujet du vocable NFC au sens large, il est nécessaire de revoir quelques bases techniques et physiques.

2.1.1 Quelques rappels théoriques nécessaires

Les applications RF (LF, HF, UHF et SHF) sont diverses et emploient de nombreuses techniques et propriétés. De plus, les phénomènes physiques qui s'y rapportent sont multiples et différent selon les technologies adoptées. Avant de les détailler, rappelons brièvement le concept physique d'onde électromagnétique.

■ Phénomène de propagation et de rayonnement

Notre but n'est pas de réécrire les très nombreux ouvrages qui existent déjà sur ces sujets mais, en quelques paragraphes, d'aider à la compréhension des problèmes spécifiques aux applications NFC. Aussi nous vous proposons de rafraîchir quelque peu vos souvenirs en examinant le plus rapidement possible le phénomène de propagation d'une onde radiofréquence, dans le cas le plus classique qui consiste à examiner le rayonnement d'un simple « doublet de Hertz ». À l'aide de cet exemple simple, nous passerons par la suite à l'examen de cas NFC concrets.

NOTE

Nous comprenons très bien que ceux qui sont hermétiques aux équations les sautent mais, s'il vous plaît, lisez les conclusions qui s'y rapportent !

■ Doublet de Hertz

Un « doublet de Hertz » est constitué d'un conducteur filiforme de longueur l et de diamètre D très petits devant la longueur de l'onde émise λ .

Si, à chaque instant, on suppose qu'une quantité d'électricité $q(t) = Q_0 \sin \omega t$ circule dans le fil de l'antenne, le courant circulant dans le doublet de Hertz sera égal à :

$$i(t) = dq/dt = Q_0 \omega \cos \omega t = I_0 \sin \omega t$$

équation dans laquelle I_0 = amplitude crête du courant.

À une distance r d'un élément de longueur dl de l'antenne considérée, ce courant produit un élément de champ magnétique de la forme dH (loi de Laplace) :

$$dH = Idl \sin \frac{\alpha}{r^2}$$

En réalité, si l'on élève un conducteur (une antenne) à un certain potentiel, il se crée autour de celui-ci un champ électrique E dont l'apparition n'est pas instantanée. En effet, il s'établit dans l'air à la vitesse de la lumière c et, en appliquant une tension alternative haute fréquence à l'antenne, on obtient une ondulation (ou vague) du champ électrique E qui, elle aussi, se déplace environ (selon le milieu traversé) à la vitesse c .

Le champ magnétique H produit dépend du champ électrique E . On observe donc également une oscillation de ce champ magnétique H se déplaçant de la même manière. L'ensemble des deux champs, l'un électrique E et l'autre magnétique H , se propage à la vitesse de la lumière. La composition de ces deux oscillations forme ce que l'on a coutume d'appeler une « onde électromagnétique », indiquée figure 2.1 (à un instant donné).

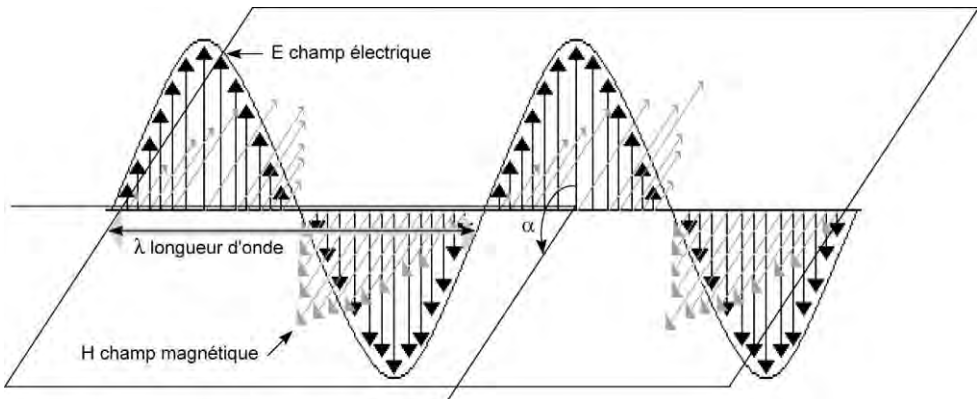


Figure 2.1 – Exemple de représentation d'une onde électromagnétique.

■ Équation de propagation

La démonstration et la résolution mathématique du phénomène de propagation et des valeurs des champs électriques et magnétiques associés sort totalement du cadre de cet ouvrage. Nous renvoyons les lecteurs à tous les ouvrages scientifiques et théoriques spécialisés sur ces sujets¹. Ceci étant, Maxwell et Hertz ont formulé les équations générales qui régissent ces champs. Celles-ci amènent à conclure que, dans le vide, les champs répondent à une équation aux dérivées partielles du second ordre, des deux variables r , la distance, et t , le temps, du type :

$$\varepsilon_0 \mu_0 \times \frac{\partial^2 E_r}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 E_r}{\partial r^2}$$

dans laquelle :

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$$

et

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{1}{36\pi} \right) \times 10^{-9} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$$

sont respectivement la perméabilité et la permittivité du vide.

La solution spatio-temporelle générale de cette équation (donc fonction des deux variables t et r) est du type :

$$E(t, r) = f\left(t - \frac{r}{\lambda}\right) = E_0 \sin\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda}\right)\right)$$

où

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

est la vitesse de propagation de l'onde dans le vide.

Ce type d'équation indique qu'en un point P de l'espace d'abscisse r , à l'instant t , la valeur $E(r)$ est égale à la valeur qu'avait $E(t, r)$ au point d'origine, à une époque antérieure de r/γ à l'instant considéré. Cette particularité mathématique indique donc que le signal $E(t, r)$ se propage dans le sens des r , avec la vitesse γ .

Sachant d'une part que : $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$, et d'autre part que :

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} = \frac{c}{\frac{\omega}{2\pi}} \text{ soit } \frac{1}{\lambda} = \frac{\omega}{2\pi c}$$

on peut écrire :

$$E(t, r) = E_0 \sin\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda}\right)\right)$$

1. Par exemple, *Transmission & propagation des ondes électromagnétiques*, Sander et Reed, Cambridge University Press, et *Fundamental of electromagnetic waves*, R. Seshadri, Addison Wesley.

$$E(t,r) = E_0 \sin \left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi r}{\lambda} \right)$$

$$E(t,r) = E_0 \sin \left(\omega t - \frac{r\omega}{c} \right)$$

$$E(t,r) = E_0 \sin \left(\omega \left(t - \frac{r}{c} \right) \right)$$

ou encore, en posant $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ (parfois noté β), dit « nombre d'onde », il vient :

$$E(t, r) = E_0 \sin(\omega t - kr)$$

fonction de t et de r , à fréquence f , où la pulsation ω est constante. La quantité kr représente le « déphasage de propagation ».

■ Équation des champs électriques E et magnétiques H rayonnés

On considère une antenne filaire disposée sur l'axe z , de longueur l petite devant la valeur de la longueur d'onde λ , et dénommée « dipôle de Hertz » ou encore « doublet de Hertz ». Elle est isolée dans un espace illimité où le rayonnement est produit par un courant $i(t) = I_0 \sin \omega t$ d'amplitude crête I_0 parcourant le fil. On démontre, en coordonnées polaires (c'est-à-dire en fonction de la distance r et des angles θ, φ), que les relations donnant les composantes des champs rayonnés – à un instant donné – en un point de mesure situé à une distance r de la source O sont celles indiquées sur la figure 2.2.

Quelle que soit la distance r , en un point considéré, elles forment un jeu de deux groupes de trois équations fonctions de r, θ et φ :

– pour le champ magnétique H :

$$H_r(t,r) = 0$$

$$H_\varphi(t,r) = 0$$

$$H_\theta(t,r) = - \left[\frac{I_0 l \sin \theta}{4\pi} \left(\frac{1}{(jr)^2} + \frac{k}{jr} \right) \right] \cdot e^{j(\omega t - kr)}$$

– pour le champ électrique E :

$$E_r(t,r) = - \left[\frac{I_0 l \cos \theta}{2\pi \epsilon_0 \omega} \left(\frac{1}{(jr)^3} + \frac{k}{(jr)^2} \right) \right] \cdot e^{j(\omega t - kr)}$$

$$E_\theta(t,r) = - \left[\frac{I_0 l \sin \theta}{2\pi \epsilon_0 \omega} \left(\frac{1}{(jr)^3} + \frac{k}{(jr)^2} + \frac{k^2}{jr} \right) \right] \cdot e^{j(\omega t - kr)}$$

$$E_\varphi(t, r) = 0$$

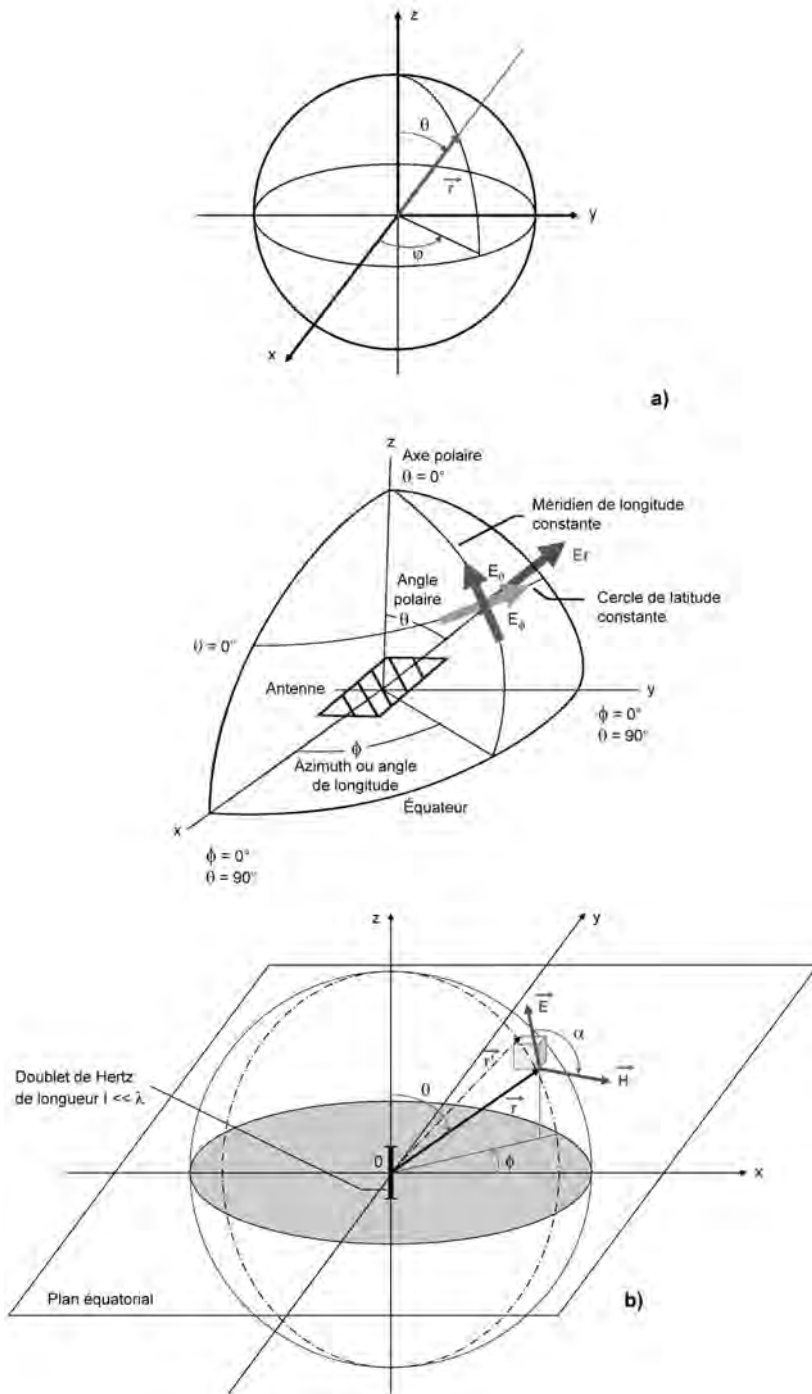


Figure 2.2 – (a) Définition des coordonnées polaires du vecteur champ électrique E . (b) Représentation des vecteurs E et H en coordonnées polaires.

ATTENTION

En posant :

ϵ_0 = permittivité du milieu

c = célérité (vitesse de propagation dans le milieu considéré)

$\omega = 2\pi f$

$\lambda = c/f$

$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ = nombre d'onde

Pour ceux qui souhaitent disposer d'éléments plus rigoureux à ce sujet, nous les renvoyons à l'annexe 1 située en fin d'ouvrage.

REMARQUES

Du fait de la symétrie de révolution autour de l'axe z due à la position du doublet situé dessus, toutes les équations précitées sont indépendantes de la variable φ .

Vous devez certainement penser que nous sommes très loin du NFC... et bien non, il n'en est rien, bien au contraire nous nous en approchons très sérieusement et même nous commençons à brûler !

2.1.2 Classification des champs et des régions de l'espace

Ces équations de base dépendent de trois paramètres principaux :

- la variable temps t ;
- la variable r selon les termes en $1/r$, $1/r^2$ et $1/r^3$. Selon que l'on pourra négliger un ou plusieurs de ces termes devant les autres, l'écriture des équations s'allégera ;
- du produit kr égal à :

$$kr = \frac{2\pi}{\lambda} r$$

■ Régions de l'espace

Considérons une antenne de dimension très petite, dont la sphère équivalente à la source de rayonnement serait de diamètre D très faible. En première approximation, on a coutume de définir trois régions de l'espace – les zones de champs proches, intermédiaires et lointains – selon les valeurs possibles de r par rapport à la valeur de la longueur d'onde λ à laquelle le système fonctionne, c'est-à-dire selon que la valeur de r est faible ou grande par rapport à :

$$\frac{1}{k} = \frac{\lambda}{2\pi}.$$

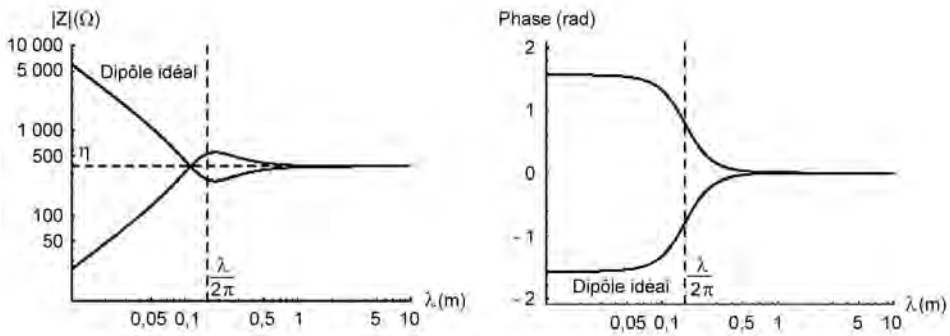


Figure 2.3 – Variation de l'impédance de l'air et de la phase E/H en fonction des champs proches ($r < \lambda/2\pi$) et lointains ($r > \lambda/2\pi$).

■ Champ lointain : $r \gg \lambda/2\pi$ (zone de Fraunhofer)

Dans cette zone (en réalité, au-delà de $2 \frac{D^2}{\lambda}$)

– connue également sous le nom de zone de Fraunhofer –, les termes en $1/r^2$ et $1/r^3$ deviennent négligeables et les valeurs des champs E et H décroissent en $1/r$. Cela se produit à partir d'une distance r environ égale à

$$\frac{\lambda}{2\pi}$$

(relation due à l'équation qui régit la valeur réelle ou imaginaire du vecteur de Poynting). En effet, à partir de cette distance, le champ est dû à un « ancien » potentiel de l'antenne. Nous sommes alors passés d'une région d'ondes quasi stationnaires à une zone de propagation d'ondes et à un régime de champ rayonné. Il ne peut plus y avoir d'effet de couplage magnétique.

■ Champ intermédiaire : r de l'ordre de λ (zone de Fresnel)

Dans cette région de l'espace (en réalité, comprise entre $0,63\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$ et $2\frac{D^2}{\lambda}$),

tous les termes en $1/r$, $1/r^2$ et $1/r^3$ sont également conservés. Nous sommes en présence d'un champ proche rayonnant où la composante de Fresnel existe quand la dimension principale de l'antenne D est grande comparativement à la longueur d'onde λ de transmission, mais la distance r est de l'ordre de λ .

■ **Champ proche : $r \ll \lambda/2\pi$ (zone de Rayleigh)... à l'origine du terme « NF – Near field » et du NFC**

Dans la région de l'espace où $r \ll \lambda/2\pi$ (en réalité, $r < 0,63\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$),

et ce quelle que soit la valeur de la fréquence à laquelle on fonctionne, c'est-à-dire dans l'environnement proche/immédiat de l'antenne, les valeurs des termes en $1/r^2$ ou $1/r^3$ sont prépondérantes sur celles des termes en $1/r$, et les champs (E , H) décroissent très rapidement.

Cette zone de champs proches – appelée fréquemment zone de Rayleigh – correspond sensiblement au passage à l'effet de « transformateur fortement couplé », où la puissance reçue P_r est pratiquement égale à celle émise P_e (contrairement à l'effet de propagation en espace libre où $P_r \ll P_e$).

Lorsqu'on se situe très près de l'antenne, le champ électrique est dû au potentiel de l'antenne, c'est le champ proche. À cette distance, on se trouve dans un régime d'ondes « quasi stationnaires » et il est possible d'établir un couplage magnétique ou électrique entre un ga et la source.

Dans cette zone, la densité de puissance surfacique rayonnée (proportionnelle au produit scalaire des modules des vecteurs \mathbf{E} et \mathbf{H}), décroît très rapidement car elle contient des termes en $1/r^5$.

Il n'est pas trop difficile de montrer que dans cette région dite de « champ proche », la valeur du vecteur de Poynting (produit vectoriel $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$) peut être soit imaginaire, il n'y a pas alors de puissance « réelle » de transmise (uniquement une puissance réactive), soit réelle, donc avec transmission de puissance.

2.1.3 Remarques concernant les applications *contactless*, RFID et NFC

À une date donnée, pour des systèmes télé-alimentés, pour des technologies de semi-conducteurs existantes et des régulations en vigueur, en guise de préliminaire, il est toujours intéressant de savoir dans quelles régions de champs « proches » ou « lointains » l'application sans contact (*contactless*)/RFID/NFC envisagée va fonctionner.

Pour cela, en prenant pour vitesse de propagation des ondes celle de la lumière $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, dressons rapidement les tableaux donnant la relation entre les valeurs des fréquences et les distances $\frac{\lambda}{2\pi}$ associées.

■ En LF et HF

Tableau 2.1

	Fréquences en MHz	Longueurs d'ondes en m	$\frac{\lambda}{2\pi}$ en m
LF	0,125	2 400	382
HF	13,56	22,12	3,52

En LF et HF, les distances de fonctionnement souhaitées/possibles pour des applications RFID sont toujours – pour des raisons technologiques, de réglementation en vigueur, de possibilités de télé-alimentation et de coût – bien plus faibles que la valeur de $\frac{\lambda}{2\pi}$.

En conclusion, depuis leurs origines, dans les applications en LF et HF, les cartes à puce sans contact, les tags RFID fonctionnent en « champs proches » (*Near Field*) et communiquant à 125 kHz et/ou 13,56 MHz. Elles font donc du NFC sans le savoir. En LF et HF, le côté NFC n'est intrinsèquement ni un scoop ni une nouveauté. Les applications reposent donc sur des principes mettant en jeu principalement des boucles inductives et des couplages de types magnétiques inductifs.

■ En UHF et SHF

Pourquoi s'intéresser aux UHF et SHF ? Tout d'abord, regardons les chiffres du tableau 2.2.

Tableau 2.2

	Fréquences en MHz	Longueurs d'ondes en cm	$\frac{\lambda}{2\pi}$ en cm
UHF	433	69,2	11,02
	866	34,6	5,51
	915	32,8	5,22
	2 450	12,2	1,94
SHF	5 890	5,1	0,8

En UHF et SHF, la plupart du temps les distances de fonctionnement souhaitées/possibles pour des applications RFID (lecture d'étiquettes sur des palettes par exemple) sont importantes (quelques mètres). Ces applications sont tout à fait réalisables tout en respectant des réglementations, mais étant donné que les distances sont toujours bien plus importantes que la valeur de $\frac{\lambda}{2\pi}$, les tags (RFID)

fonctionnent en « champs lointains ». Ils devront donc utiliser des principes de couplage avec la base station autres que celui du couplage magnétique, par exemple par phénomène de propagation de types électromagnétiques et de re-rayonnement d'onde par *back scattering*. Cependant, n'en déplaise à certains, rien n'empêche en UHF de fonctionner à quelques centimètres (3-10 cm) de la source rayonnante, et par conséquent en champ proche, donc en NFC en UHF ou encore NFC en SHF (voir chapitre 19).

En UHF à 900 MHz ou bien à 2,45 GHz, un dispositif fonctionnant à une distance de l'ordre 10, 20 cm ne fonctionne plus en champ lointain mais en champ proche, donc en *Near Field*. Si de plus il communique, il fera aussi partie de la grande famille des produits ayant réellement le droit de porter le nom de NFC !

En résumé : Near Field Communication avec

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{f}$$

Champ proche (couplage magnétique) < $\frac{\lambda}{2\pi}$ < Champ lointain (propagation d'ondes)

Tableau 2.3

	Fréquences	Longueurs d'ondes	$\frac{\lambda}{2\pi}$	Zone des champs proches pour application en « NFC »	Début des champs lointains > ~ 3 λ
LF	125 kHz	2 400 m	382 m	Toujours	1 100 m
HF	13,56 MHz	22,12 m	3,52 m	Toujours	11 m
UHF	433 MHz	69,2 cm	11,02 cm	De 0 à ~12 cm	24 cm
	866 MHz	34,6 cm	5,51 cm	De 0 à ~6 cm	18 cm
	915 MHz	32,8 cm	5,22 cm	De 0 à ~5,5 cm	17 cm
	2,450 GHz	12,2 cm	1,94 cm	De 0 à ~2 cm	6 cm
SHF	5,890 GHz	5,1 cm	0,8 cm	De 0 à ~1 cm	3 cm

REMARQUE IMPORTANTE

L'utilisation du terme NFC n'est pas réservée aux LF et HF, mais il est aussi adapté aux UHF et SHF.

2.2 Les contraintes génériques habituelles

Au cours des prochains paragraphes de cette seconde partie de chapitre, nous allons évoquer le volet de l'histoire qui concerne les principales contraintes entourant les applications de type NFC.