



HAL
open science

Synthèse bibliographique sur l'affaiblissement de propagation radioélectrique par pénétration dans les bâtiments

Jean-Pierre Barbot, A.J. Levy

► **To cite this version:**

Jean-Pierre Barbot, A.J. Levy. Synthèse bibliographique sur l'affaiblissement de propagation radioélectrique par pénétration dans les bâtiments. [Rapport de recherche] Note technique CRPE n° 195, Centre de recherches en physique de l'environnement terrestre et planétaire (CRPE). 1992, 27 p. hal-02191659

HAL Id: hal-02191659

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02191659>

Submitted on 23 Jul 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

RP 11640

**CENTRE NATIONAL D'ETUDES
DES TELECOMMUNICATIONS**

**CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**CENTRE DE
RECHERCHES
EN PHYSIQUE DE
L'ENVIRONNEMENT
TERRESTRE
ET PLANETAIRE**

CRPE

NOTE TECHNIQUE

CRPE/195

**SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR
L'AFFAIBLISSEMENT DE PROPAGATION
RADIOELECTRIQUE PAR PENETRATION
DANS LES BATIMENTS**

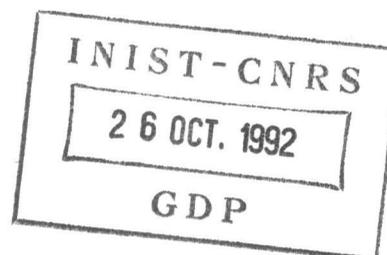
Par

J.P. BARBOT

A.J. LEVY



**RPE/ETP
38-40, rue du Général Leclerc
92131 ISSY-LES-MOULINEAUX, FRANCE**



INGE
TEL

G 100702

CENTRE NATIONAL D'ETUDES
DES TELECOMMUNICATIONS
Centre Paris B

CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Département S.D.U.

**CENTRE DE RECHERCHES EN PHYSIQUE DE
L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE ET PLANETAIRE**

NOTE TECHNIQUE CRPE/195
Mars 1992
(DOCUMENT PROJET RAMEAU)

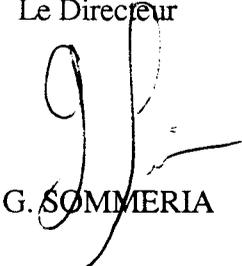
**SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'AFFAIBLISSEMENT
DE PROPAGATION RADIOELECTRIQUE PAR
PENETRATION DANS LES BATIMENTS**

par

**J.P. BARBOT, A.J. LEVY
RPE/ETP**

CRPE, 38-40 rue du Général Leclerc, 92131 ISSY LES MOULINEAUX

Le Directeur


G. SOMMERIA

Le Chef de Département


J.C. BIC

LISTE DE DIFFUSION SYSTEMATIQUE

CNET

MM.	FENEYROL THABARD FUERXER	Directeur du CNET Directeur Adjoint du CNET Adjoint Militaire au Directeur du CNET
	MEREUR BLOCH THUE	Directeur des Programmes DICET DICET~
MME	HENAFF	DICET
MM.	PIGNAL RAMAT ZYLBERSZTEJN MALOBERTI HOCQUET THEBAULT SOMMERIA BERTHELIER GENDRIN	PAB PAB PAB-BAG PAB-SHM PAB-STC PAB-ST PAB-ST PAB-RPE PAB-RPE PAB-RPE
MME	PARIS	PAB-RPE
MM.	BAUDIN BIC CERISIER LAVERGNAT ROBERT ROUX VIDAL-MADJAR	PAB-RPE PAB-RPE PAB-RPE PAB-RPE PAB-RPE PAB-RPE PAB-RPE FRANCE
	TESTUD	PAB-RPE

CNRS

M.	BERROIR	TOAE
MM.	CHARPENTIER CADET	SPI INSU
MME	COUTURIER	INSU
MME	SAHAL	TOAE
M.	MEGIE	MEN

CNES

MMES	AMMAR DEBOUZY	
MM.	BAUDOIN FELLOUS HERNANDEZ (Toulouse)	

EERM

M.	ANDRE	
----	-------	--

Bibliothèques

CNET-SDI (2)
CNET-EDB
CNET-RPE (Issy) (5)
CNET-RPE (St Maur) (2)
Observatoire de Meudon
CNRS-SA
CNRS-INIST —
CNRS-LPCE

LISTE COMPLEMENTAIRE

DIR/MRV	KWONG-CHEONG
---------	--------------

PAB/SHM	VIVIER
PAB/SHM	DUPUY
PAB/SHM	DESMOULIN
PAB/SHM	BRUNET
PAB/SHM	GRANDMOUGIN
PAB/SHM	BROSSARD
PAB/SHM	IMBEAUX
PAB/SHM	AZOULAY
PAB/SHM	BENOIT-GUYOD
PAB/STS	ROUSSEL
PAB/STS	PIPONNIER
PAB/STS	VERNET
PAB/ETP	GLOAGUEN
PAB/ETP	SYLVAIN
PAB/ETP	ROSSI
PAB/ETP	MON
PAB/MCT	BON

PAA/SRE	POULLAIN
PAA/CER	MAZZIOTTO

LAA/ELR	ARZUR
LAA/RSM	GONET
LAA/RSM	COATANEA
LAA/ELR	DJEBARI
LAA/ELR	ZEDDAM

LAB/OCM	ROGER
LAB/IFE	TREGUIER
LAB/IFE	GUILLOU
LAB	BLANQUART
LAB/SMR	LOUSSOUARN

CNES GRENOBLE	
CNS/TCS	TORRES

CCETT RENNES

SRL/DRL	JOLIFF
SRL/DRL	CABOS
SRL/DRL	LE DAIN
SRL/DRL	VINATIER
SRL	PACE

EXTERIEUR

DRM/PRC	BONIFAY
DOC/TRT	Mme MARTIN
ENST BREST	DOUILLY
CCETT DOC.	
CELAR	MAHE

Synthèse bibliographique sur l'affaiblissement de propagation radioélectrique par pénétration dans les bâtiments

Résumé

Dans le cadre du développement des services de communication avec les mobiles accessibles dans les bâtiments (systèmes micro ou pico-cellulaires, PABX sans fil, etc...) et des études menées dans le projet RAMEAU, la présente note propose une synthèse bibliographique sur l'affaiblissement de propagation radioélectrique par pénétration dans les bâtiments. Les chiffres disponibles dans la littérature sont répertoriés et classés en fonction des divers paramètres qui peuvent influencer sur leurs valeurs, et ces résultats sont analysés. Une réflexion est menée sur les études à entreprendre dans ce domaine, et sur la manière de les mener.

Synthèse bibliographique sur l'affaiblissement de propagation radioélectrique par pénétration dans les bâtiments

J.P. Barbot, A.J. Lévy

(DOCUMENT PROJET RAMEAU)

- I Introduction**
 - I-1 La notion de perte par pénétration
 - I-2 Les valeurs des pertes par pénétration

- II Les divers facteurs influant sur les pertes par pénétration**
 - II-1 Influence du type de construction
 - II-2 Influence des matériaux de construction
 - II-3 Evolution des pertes avec la hauteur
 - II-4 Influence de la hauteur de l'antenne de base
 - II-5 Influence de l'orientation du bâtiment par rapport à la direction de la station de base
 - II-6 Evolution des pertes avec la fréquence

- III Le facteur de perte par pénétration dans les modèles de prévision de l'affaiblissement**

- IV Les lacunes, les études à entreprendre en priorité**

- V Conclusions**



Synthèse bibliographique sur l'affaiblissement de propagation radioélectrique par pénétration dans les bâtiments

I Introduction

Pendant longtemps le service quasi unique de radiocommunications mobiles a été le radiotéléphone de voiture, qu'il était hors de question d'utiliser à l'intérieur de bâtiments. Avec le récent développement et la diversification des services mobiles, avec également l'apparition de terminaux portables et autonomes, se posent aujourd'hui tous les problèmes liés à cette utilisation en intérieur.

Un de ces problèmes qui surgit avec le plus d'acuité concerne par exemple la demande des usagers de réseaux "classiques" macrocellulaires qui souhaiteraient utiliser leur radiotéléphone portable en toutes circonstances et en particulier en intérieur. Mais plus généralement, les opérateurs, dont FRANCE TELECOM, devront être en mesure d'offrir des services de communication mobiles non seulement dans des lieux publics (gares, locaux administratifs, etc.), à l'intérieur desquels il sera peut-être possible d'installer des stations de base de réseaux picocellulaires, mais aussi dans des locaux privés d'habitation, de bureaux ou autres. Dans ce dernier cas selon toute vraisemblance les stations de base pourraient être à l'extérieur, sur la voie publique, sur des façades d'immeubles, sur des toits ou points hauts etc.

Le CNET a récemment engagé des études de propagation radioélectrique relatives à toutes sortes de nouveaux contextes qu'impliquent le développement des services. Ces nouvelles études donnent la priorité aux bandes de fréquence entre 1 et 3 GHz qui viennent d'être redistribuées au profit entre autres des services mobiles. En particulier a été entreprise l'étude du canal radiomobile reliant une station de base en extérieur à un terminal portable à l'intérieur de locaux (il faut distinguer ce canal de celui entièrement intérieur). Ce canal comporte ce qu'il est convenu d'appeler des affaiblissements de propagation par pénétration dans les bâtiments.

L'objet de cette note est de proposer une synthèse bibliographique sur ce sujet des pertes de pénétration, en tâchant de comparer, d'analyser et de synthétiser les résultats publiés, et de dégager les mesures à effectuer. Il faut cependant d'emblée observer que la littérature scientifique concernée n'est pas

particulièrement abondante. Une recherche que nous avons voulue exhaustive n'a pu rassembler que 27 références. En conséquence, si ces premières indications sont précieuses, il faut garder à l'esprit que ces résultats restent à conforter et détailler, et que de nombreuses lacunes subsistent.

I-1 La notion de perte par pénétration

Il existe dans la littérature deux définitions de l'affaiblissement de propagation supplémentaire attribué à la pénétration dans un bâtiment (nous désignerons désormais cet affaiblissement sous le terme de "perte par pénétration").

La première de ces définitions a été énoncée par Rice [1] : la perte par pénétration serait la différence entre la puissance moyenne du signal radioélectrique relevée sur un petit espace en un point du bâtiment, et la valeur moyenne mesurée à l'extérieur, au niveau de la rue, et tout autour de ce bâtiment. La seconde est due à Durante [2] : il compare pour une même altitude, la puissance moyenne du signal sur un petit espace à l'intérieur, à celle sur un petit espace à proximité du premier mais à l'extérieur. En ce qui concerne la mesure des pertes, c'est sans aucun doute la première définition qui est la plus simple et la plus facile à mettre en application. De plus, les modèles de propagation actuellement disponibles prédisent la puissance du signal au niveau de la rue. Ces raisons font que la définition de Rice est utilisée dans une grande majorité de publications. C'est celle que nous retiendrons dans la suite de cette note, mais nous reviendrons sur cette question au § IV.

La définition de Rice [1] s'appuie sur une puissance moyenne reçue sur un petit espace à l'intérieur du bâtiment. Ce calcul d'une moyenne de la puissance, ou d'une autre valeur localement représentative telle que la médiane, est tout à fait fondamental. En effet, il doit être clair que les phénomènes qu'il est souhaitable de mettre en évidence sont les effets dus aux murs extérieurs (ou murs d'enceinte des bâtiments), et qu'en conséquence il faut écarter les phénomènes d'affaiblissements rapides dus aux interférences entre les multiples trajets. Ces moyennes locales seront calculées sur des petits espaces dont la dimension typique vaudra la dizaine de longueurs d'onde.

I-2 Les valeurs des pertes par pénétration

Les valeurs de la perte par pénétration, évaluées par différents auteurs et dans différents contextes, sont très variées. Dans la bande des 900 MHz, les pertes extrêmes rapportées vont de **0,4 à 29 dB**. Pour les fréquences

allant de 1 à 2 GHz ces pertes se situent entre **2 et 18 dB**. (il n'existe pas encore, à notre connaissance, de résultats pour des fréquences comprises entre 2 GHz et 3 GHz).

Il est bien évident que de telles dispersions des résultats sont trop grandes pour que ce dernier énoncé ait une valeur significative. Il convient donc de distinguer ces informations suivant certains critères, en les regroupant par exemple par type d'habitation, ou encore, par type de matériaux de construction intervenant dans la constitution des murs extérieurs. Nous allons en conséquence dans la suite de ce document, nous attacher à étudier l'influence de chacun des paramètres susceptibles d'avoir une incidence sur les pertes dues à la pénétration. Ces résultats seront résumés sous forme de tableaux.

II Les divers facteurs influant sur les pertes par pénétration

II-1 Influence du type de construction

Le premier paramètre examiné, qui peut influencer sur les pertes, est le type de construction. Dans le but d'obtenir une présentation simple des résultats de mesures de pénétration, nous avons adopté la classification des types de bâtiments proposée par Molkdar D. [23] (tableau 1). Le tableau 2 rassemble ces résultats.

Numéro de catégorie	Description
1	Immeubles résidentiels -suburbain
2	Immeubles résidentiels -urbain
3	Immeubles de bureaux-suburbain
4	Immeubles de bureaux-urbain
5	Bâtiments industriels avec des grosses machines
6	Autres bâtiments industriels : gymnases halls d'exposition
7	Environnement ouvert : Gare, aéroport
8	Souterrain : metro, passage piéton, caves

Tableau 1 Classification des types de construction proposée par Molkdar [23]

Ref	Fréquence (MHz)	Pertes pénétration en dB	Catégorie	Mesures	h(m)antenne d'émission
[1]	35	24	4	BE	NC
	150	22	4	BE	NC
[3]	1652	11,5	4	BE	6
[4]	950	4 à 9,4	4	BE	30
	1705	3 à 8,4	4	BE	30
[5]	1705	2 à 17 dB	3	BE	Mat 10
[6]	441	16,37 à 21,31	4	BE	20 et 25
	900	11,61 à 18,9	4	BE	20 et 25
	1400	7,56 à 14,92	4	BE	20 et 25
[12]	905	3,8	4	BL	
	1305	3,9 à 10,5	4	BL	6
[13]	850	18	4	BE	NC
		13,1	3	BE	NC
		7,3	1	BE	NC
[15] & [11]	1790,5	11,47 à 16,83	4	BE	20 et 25
[16]	815	0,4 ; 4,6 ; 21,6	1	BE	8,23
[17]	815	2,8 à 12,1	1	BE	8,23
[18]	815	5,1 et 5,6	1	BE	3,81 et 8,23
[19]	900	29 (murs alu)	1	BE	3,04
[20]	1290	5,5	4	BE	N.C orientation variable -52° à 63 ° par rapport à perpend.
[21]	252,8	19,7	4	BE	120
[22]	860			BE	
	1550	moyenne 6,3	1	BE	Satellite ATS-6
	2569	3 à 24		BE	
[26]	1566,02	10,74	4	BE	50
[27]	835	2 à 22	5	BE	NC

BE: Bande Etroite
BL: Bande Large

Tableau 2 Pertes par pénétration classées par catégorie de bâtiment

Il est alors possible de dégager un ordre de grandeur des pertes par pénétration suivant la catégorie de bâtiment étudiée :

Par exemple, pour les bâtiments de type résidentiel (les habitations) et dans des bandes voisines de 900 MHz, les pertes observées sont comprises entre 0,4 et 29 dB. Pour ce type de bâtiments, les études les plus complètes sont celles conduites par Cox et autres [16,17,18], avec des pertes par pénétration (moyennes) variant de 0,4 à 21,6 dB, ceci pour des constructions composées de métal et de bois. Une valeur particulièrement élevée : 29 dB a été mesurée par Hoffman et Cox [19] pour une habitation en aluminium. Toujours dans cette catégorie, l'expérience de Wells est à remarquer pour son originalité, car elle utilise un satellite (ATS-6), les résultats de perte par pénétration obtenus s'échelonnent de 3 à 24 dB. Il faut noter que l'ensemble des résultats mentionnés



pour cette catégorie ont été obtenus pour des constructions américaines, qui diffèrent sensiblement des constructions européennes.

Les résultats de pertes par pénétration pour les immeubles de bureaux en milieu suburbain varient de 2 à 17 dB. L'étude détaillée et complète de Backman et autres [5] est assez représentative des divers types de construction rencontrés en Europe, constructions dans lesquelles le béton occupe une part importante.

La catégorie des immeubles de bureaux regroupe le plus grand nombre de résultats. Pour ces immeubles, couramment rencontrés en milieu urbain et pour les fréquences qui nous intéressent, c'est à dire comprises autour de 900 MHz et dans la bande 1-3 GHz, les pertes par pénétration varient de 3 à 18,9 dB. Un cas extrême de pertes par pénétration de 36,6 dB est mentionné dans [20] pour une surface vitrée, cette valeur particulièrement élevée est attribuée à une orientation de la base parallèle à la surface vitrée.

Il nous semble que la conclusion que l'on doit tirer de ces résultats est que cette distinction des résultats par type d'immeuble n'est pas réellement judicieuse dans la mesure où les résultats par catégorie restent d'une part assez dispersés et d'autre part relativement semblables d'une catégorie à l'autre.

II-2 Influence des matériaux utilisés dans la construction

Les matériaux de construction ont une influence significative sur les pertes par pénétration. Mais il est plus que vraisemblable que le nombre et la taille des ouvrants (portes baies, fenêtres), ainsi que la nature du matériaux constituant ces ouvrants (bois, verre semi-réfléchissant, verre armé, etc.) aura une influence au moins aussi importante et sans doute indissociable du premier effet.

Le tableau 3 résume des résultats de Backman et autres [5] relevés à 1700 MHz. Lors de ces mesures, six sites ont été étudiés : cinq bâtiments scolaires d'architectures fort différentes et le bâtiment abritant la "Swedish Telecom Radio". Ce qui représente neuf immeubles au total, dont certains sont de constructions identiques, permettant ainsi d'étudier l'influence de l'orientation du bâtiment vis à vis du site de base (voir II-5).

Type de mur	Nbre de moyennes locales (1)	Pertes par pénétration (en dB)		
		min (dB)	max (dB)	moy. (dB)
Epais en béton (25 cm) avec larges fenêtres	66	4	5	5
Epais en béton (25 cm) avec larges fenêtres	70	9	12	11
Béton épais sans fenêtre	25	10	18	13
Double épaisseur de béton (2*20cm)	20	14	20	17
Peu épais (10cm) en béton	50	3	7	6
Briques (25cm) petites fenêtres	34	3	5	4
mur métallique fenêtres larges et renforcées	20	9	11	10
Verre	22	1	3	2
Verre renforcé(armé)	18	7	9	8

Tableau 3 Résultats des mesures de pénétration effectuées par Backman et autres [5] à 1700 MHz.

(1) chaque moyenne est effectuée sur 400 mesures collectées sur un cercle de 50 cm et à une hauteur de 1,5 m.

(2) les deux premières lignes représentent les mesures effectuées dans 2 bâtiments de type identique que mais d'orientation différente vis-à-vis de la base.

Type de construction	Affaiblissement F : 450-1000 MHz
Mur en béton 20 cm	7-10 dB
Mur ou plancher en béton massif (15 cm)	12-18 dB
Mur plein en métal	20-40 dB

Tableau 4 Données d'affaiblissement par pénétration du CCIR [14]

Type de mur	Pertes par pénétration à 1750 MHz	Pertes par pénétration à 955 MHz
Epais en béton (20 cm) avec larges fenêtres	5,4	5,0
Epais en béton (30 cm)	9,4	8,4
63 cm de brique	4,0	3,3
70 cm de brique	4,5	3,8
100 cm de brique	9,1	3,9
70 cm de brique	9,1	8,0
béton poreux	6,6	4,0

Tableau 5 Résultats de mesures effectuées par Sandén [4]

Le tableau 4 reproduit les valeurs proposées par le CCIR. Enfin les résultats de Sandén sont synthétisés dans le tableau 5. Il est intéressant de constater, d'une part, que n'apparaissent pas de contradictions importantes entre ces différentes sources (tableau 3 à 5), et que d'autre part, si on se limite par exemple au cas courant d'un mur extérieur en béton comportant des fenêtres, les affaiblissements observés, qui vont de 4 à 12 dB, présentent une dispersion raisonnable.

II-3 Evolution des pertes avec la hauteur

Ce que nous appelons ici "effet de la hauteur" est l'effet constaté en comparant la puissance moyenne du signal, dans le bâtiment, au niveau du rez-de-chaussée, et la valeur moyenne de la puissance de signal à des étages différents. On constate généralement un gain lorsqu'augmente la hauteur, gain dont la valeur se situe aux alentours de **2 dB** par étages [4,6,13]. Le tableau 6 rapporte le gain par étage rencontré lors de plusieurs expériences. L'article de Turkmani et autres [6] fait état d'une tendance inverse au delà du sixième étage. Une cause possible de cette inversion pourrait être la position particulière et les caractéristiques de l'antenne d'émission. Il aurait donc sans doute été intéressant de corrélérer ces résultats de mesure avec les caractéristiques correspondantes des antennes d'émission (les caractéristiques importantes de ce point de vue étant le gain, l'ouverture verticale, ainsi que le diagramme de rayonnement horizontal, omnidirectionnel ou directionnel vers une direction particulière).

Référence biblio.	"Gain" par étage	Fréquence
[4]	1,8 dB	955 MHz
[4]	1,9 dB	1705 MHz
[6]	2 dB	441 MHz
[6]	2 dB	896,5 MHz
[6]	2 dB	1400 MHz
[13]	1.9 dB	850 MHz
[13]	2 dB	900 MHz
[15]	1,5 dB	1800 MHz
[16]	-1,5 à 4,1 dB	800 MHz

Tableau 6 Effets dus à la hauteur : gain par étage

Notons que des mesures ont également été conduites dans des sous-sol. L'accroissement relevé de l'affaiblissement, qui est de l'ordre de 10 dB par rapport au niveau moyen constaté au rez-de-chaussée, paraît naturel.

II-4 Influence de la hauteur de l'antenne de base

L'étude de l'influence de la hauteur d'antenne de base proprement dite, nous paraît importante : d'une part cette hauteur pourrait influencer sur le gain par étage évoqué ci-dessus, et d'autre part modifier les angles d'incidence des trajets radioélectriques sur les bâtiments, et modifier par ce biais les pertes par pénétration. Nous n'avons cependant trouvé qu'une seule référence traitant de cette question [18]. L'expérience a été conduite sur plusieurs sites différents (4 habitations résidentielle en milieu suburbain), où l'antenne d'émission était placée successivement à deux altitudes différentes par rapport au niveau du sol: 3,81 m et 8,21m. Pour une même fréquence de 815 MHz, les différences d'affaiblissement constatées entre ces deux hauteurs sont respectivement de 4,9 dB, 4,4 dB et 5,4 dB pour l'extérieur, le rez-de-chaussée et le sous sol. En ce qui concerne les différences de pertes par pénétration, elle sont de 0,5 dB (étant

entendu que l'affaiblissement augmente lorsqu'augmente la hauteur de l'antenne d'émission). Le gain par étages varie lui de 0,8 dB. La hauteur d'antenne d'émission ne semble donc avoir qu'un effet limité sur les pertes par pénétration et sur le gain par étage. Par contre, comme l'on pouvait s'y attendre, la hauteur d'antenne influe de façon significative sur la couverture radioélectrique du bâtiment. Il convient cependant de souligner ici qu'il ne s'agit des résultats que d'une seule expérience, conduite sur 4 immeubles d'habitation en milieu suburbain.

II-5 Influence de l'orientation du bâtiment par rapport à la direction de la station de base

La direction dans laquelle se trouve la station de base par rapport au bâtiment est une direction privilégiée d'arrivée des trajets radioélectriques. L'angle que fait cette direction avec la façade du bâtiment influe sans doute considérablement sur la perte par pénétration. L'article de Backman [5], fait ainsi état de différences de perte non négligeables, pour des bâtiments semblables comportant de grandes baies vitrées (7 dB de différence, voir les deux premières lignes du tableau 3). Cette différence est sans doute attribuable aux orientations différentes des bâtiments par rapport au site d'émission. Ce même phénomène a également été constaté précédemment par Horikoshi [17].

II-6 Evolution des pertes avec la fréquence

Les résultats disponibles relatifs à la dépendance en fréquence des pertes par pénétration sont trop contradictoires pour que l'on puisse en tirer une quelconque conclusion. Les résultats de Turkmani et autres [6], fruit d'une comparaison sur trois fréquences des pertes de pénétration de deux bâtiments (appelés C et D), font état d'une diminution des pertes lors de l'augmentation en fréquence (gain aux alentours de 1,5 dB lorsque l'on passe de 441 MHz à 869,5 MHz et de 4,3 dB de 869,5 à 1400 MHz). Ces résultats sont cohérents avec ceux publiés par Rice [1], ou ceux de Komura et autres [18]. Les résultats de Turkmani et autres sont rappelés dans le tableau 7.

En revanche ces résultats sont en contradiction avec ceux de Sandén [4], qui a conduit des essais de pénétration à 2 fréquences, et qui trouve lui au contraire un accroissement des pertes de pénétration, et ce pour plusieurs sites de mesure. L'ensemble de ses résultats est regroupé dans le tableau 8.

	Fréquence	Pertes par pénétration (dB)	Gain par étage (dB)
Article [6]	441 MHz	C = 16,37 D = 21,31	2,0
	896,5 MHz	C = 11,61 D = 18,09	2,0
	1400 MHz	C = 7,56 D = 14,92	2,0
Article [15]	1800 MHz	C = 12,1 D = 13,2	1,5

Tableau 7 Effets dus au changement de fréquence (Turkmani et autres). Ces mesures ont été effectuées sur le campus de l'université de Liverpool, dans deux bâtiments : C (6 étages) et D (3 étages). L'émetteur se situait dans un troisième bâtiment dénommé B. 235 mètres séparent les bâtiments B et C, et la liaison est en "visibilité partielle". 290 mètres séparent B de D avec une liaison sans visibilité.

Bâtiment	1705MHz		955 MHz		en dB
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	
Asö gymnasium	5,4	2,7	5,0	3,5	
Södra Latin	9,1	1,3	3,9	2,4	
Tele Larm	9,4		8,4		
Teaterhögskolan	4,0	2,2	3,3	1,7	

Tableau 8 Effets dus à la fréquence sur les affaiblissements par pénétration [4] mesurés dans 4 bâtiments. Les statistiques sont extraites de 37 fichiers de mesures par fréquence.

Il est assez étonnant que des résultats qui semblent assez fondés, et qui sont dans chaque cas étayés par de nombreuses mesures produisent des résultats contradictoires. Une explication qui nous paraît possible est que l'évolution des pertes avec la fréquence est la résultante de plusieurs effets contradictoires dont l'importance relative dépend des situations : d'une part une réduction de la longueur d'onde facilite la propagation au travers des ouvrants, et d'autre part cette même réduction accroît l'affaiblissement par traversée des murs.

Les effets liés aux changements de fréquences qui sont bien sûr d'une importance considérable, méritent en tout cas une étude plus approfondie.



III Le facteur de perte par pénétration dans les modèles de prévision de l'affaiblissement

Plusieurs méthodes de prévision du champ radioélectrique ont été développées pour l'intérieur des bâtiments. Aux fréquences qui nous intéressent ce sont des modèles établis par traitement statistique de (nombreuses) données expérimentales, et non à partir de considérations physiques. Ils ont été développés, pour la presque totalité, pour la propagation à l'intérieur des bâtiments, mais l'un d'entre eux [12] a été étendu par adjonction d'un terme supplémentaire pour traiter également la pénétration dans les bâtiments.

Plus précisément, il s'agit de la méthode de Johnson et autres. Nous nous intéressons ici, d'une part, aux facteurs de perte, indépendants de la distance, et attribués à la traversée de chacun des éléments des constructions intérieures (murs, cloisons...), et d'autre part au terme de "pénétration".

L'affaiblissement prédit, selon cette méthode de prévision, s'écrit :

$$P_{Loss} = C + 10 * n * \log_{10}(r) + \sum_{i=1}^I k_{fi} L_{fi} + \sum_{j=1}^J k_{wj} L_{wj} + W_e \quad (1)$$

les données d'entrée étant :

r : distance entre base et mobile

Kfi ,Kwi: nombre de plancher , resp. de mur, de catégorie i traversés

et les paramètres :

We : Pertes par pénétration

Lfi, Lwi : facteur de perte par plancher, resp. par mur, de catégorie i

Le terme We relatant l'affaiblissement dû à la pénétration a été évalué par les auteurs, selon la nature du mur extérieur, entre 3,9 et 10 dB.

Il existe une différence notable entre ce modèle et ceux qui ne prennent pas en compte les pertes par pénétration : outre le terme supplémentaire We, le sens du terme Lfi y est assez différent. Ce terme devient un simple terme correctif, et non plus un terme important d'affaiblissement fonction du nombre de planchers séparant base et mobile. En effet, dans le cadre d'une configuration où la base se situe à l'extérieur, le trajet direct entre base et mobile sera prépondérant, et peu de signal se propagera à travers les planchers. Les résultats § II-c, où le terme Lfi est un gain (et non un affaiblissement) évalué

approximativement à 2 dB, viennent conforter cette analyse.

Le terme L_{wi} peut être obtenu de diverses façons : soit en mesurant la puissance moyenne de chaque côté d'un mur, ou, plus logiquement dans ce contexte, par identification des paramètres du modèle sur les mesures disponibles. Des résultats récents indiqueraient que les deux procédés aboutiraient approximativement à la même valeur [3].

Le terme n prend selon les cas différentes valeurs. Pour une modélisation décrivant uniquement l'intérieur des bâtiments, il est souvent proche de 2, ce qui implique que les termes L_{wi} et L_{fi} recouvrent toutes les pertes en excès par rapport à l'espace libre. Dans le cas d'une configuration où la base est à l'extérieur, des résultats similaires ont été constatés dans la référence bibliographique [12], pour des cas où base et bâtiments étaient en visibilité et à une distance n'excédant pas 100 m.

Les résultats obtenus par Johnson et autres, en appliquant cette méthode pour décrire leurs mesures sont regroupés dans le tableau suivant :

Mur extérieur (description)	W_e (dB)	Mur intérieur (description)	Pertes L_{wi} (dB)	Plancher (description)	L_{fi} (dB)	n (fixé)
Verre et métal sur structure métal.	3,9	Cloisons métalliques	3,8		0	2
Verre recouvert de metal sur structure métal.	6,9	Cloisons métalliques	0,6	Béton	11,5	2
Béton armé, brique carrelage	10,5	Cloisons métalliques	8	NC	0,4	2
Béton armé	5,1	Bois et plastique	0,9	NC	0,6	2

Tableau 9 : Paramètres du modèle de Johnson [12] obtenus à partir de résultats sur 4 sites différents (20 à 40 mesures par sites), à 1705 MHz et remis en forme dans [11]. Dans ce modèle W_e peut être compris comme un terme de perte par pénétration, et L_{wi} un affaiblissement à la traversée d'un mur intérieur.

Il faut conclure de l'examen de ces valeurs que le terme W_e du modèle de Johnson est essentiellement de même nature (et prend des valeurs très semblables) que l'affaiblissement de propagation tel qu'il peut se mesurer directement sans référence à une méthode de prévision de l'affaiblissement.

IV Les lacunes, les études à entreprendre en priorité

Il est clair, à l'examen de l'ensemble des résultats rassemblés précédemment, que la pénétration des ondes radioélectriques dans les bâtiments, bien que l'étude s'en poursuive depuis plusieurs années, reste largement méconnue aux fréquences qui nous concernent. Il semble donc important de recenser quelles sont les lacunes les plus criantes, et quelles actions et études seraient à entreprendre en priorité pour mieux caractériser ces pertes.

La première de ces lacunes concerne le volume des données qui ont servi à établir les résultats publiés : même si, sur chacun des points examinés précédemment, il a été possible de trouver quelques résultats donnant des éléments de réponses, ces éléments sont souvent sujet à caution du fait de la faible quantité de données examinées. Il suffit pour s'en convaincre, de consulter le tableau suivant (tableau 10), qui recense par équipe et par pays les publications rapportant des résultats expérimentaux et qui ont permis la rédaction de ce document.

Il nous semble, dans ce contexte, que les études à entreprendre pourraient s'articuler suivant deux axes.

A relativement court terme, constatant que les modèles de prévision actuellement disponibles sont des modèles statistiques qui savent prévoir le niveau de champs radioélectrique au niveau du sol, il serait judicieux :

- de conduire des campagnes de mesure du terme d'affaiblissement complémentaire entre le niveau de champ à l'extérieur au niveau du sol et celui à l'intérieur à différents emplacements et dans divers contextes,
- d'exploiter les données ainsi recueillies pour compléter les modèles statistiques disponibles, par un terme de pénétration, et dans une approche classique également statistique.

Pour revenir au débat introduit au § 1, cette démarche implique clairement que l'on privilégie lors des campagnes de mesures, la définition des pertes par pénétration proposée par Rice [1] par rapport à celle de Durante [2].

Auteurs (Regroupés par pays)	Laboratoire	Pays	Ref et Année de publication
Rice L.P.			[1]1958
H.H. Hoffman Cox D.C. Murray R.R. Norris A.W. Walker	A.T.&T. Bell Laboratories	USA	[19]1982 [16]1983 [17]1984 [18]1985 [13]1983
Wells P.	ITS, Office of Telecommunications		[22]1977
A. F.de Toledo Turkmani A.M.D. Parson J.D. Lewis D.G.	Université de Liverpool		[6]1988 [15]1990
I.T. Johnson W. Johnston F.J. Kelly S.T.S. Chia	British Telecom Research Laboratories	U.K.	[12]1990 [25]1991
Benzair P.L. Renduchintala V.S.M. Smith H. Williams D.H.	University of Bradford		[26]1989
P. Backman S. Lidbrink T. Ljunggren Magnus Sandèn	Televerket Radio	Suède	[5] 1990 [4] 1990
	CSELT	Italie	[7] 1989
S. Ruiz Boque M. Ballart C.Clua Ramon Agusti Comes	Université de Barcelone	Espagne	[3] 1991
M. Komura T. Hogihira M. Ogasawara	Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation	Japon	[20]1986
K. Tanaka J. Horikoshi T. Morinaga	NTT(ECL) Gunma University		[21]1977

Tableau 10 Equipes regroupées par laboratoire et par pays, ainsi que leurs publications

A un peu plus long terme, il faudra étudier et comprendre les phénomènes particuliers et nouveaux qu'impliquent la propagation radioélectrique par pénétration et dans les bâtiments. Cette compréhension passera sans doute par une meilleure connaissance des caractéristiques électromagnétiques des matériaux de construction, ou encore par la caractérisation de "composants" hétérogènes tels qu'une porte, une fenêtre ou une cloison (des études externes ont été lancées au CNET précisément sur ces deux sujets). Les résultats de telles études constitueront les briques de base nécessaires à l'établissement de modèles de connaissance pour la prévision de la propagation dans les bâtiments. Les mesures du type de celles proposée par Durante, comparant le champ radioélectrique à l'intérieur d'une pièce et immédiatement à l'extérieur en vis à vis, prennent leur place et tous leur sens dans cette seconde démarche.

Concernant l'outil expérimental nécessaire aux expérimentations, il se doit de répondre à un certain nombre d'exigences. A ce sujet, il est utile de noter les éléments suivants :

- la définition des pertes de pénétration suppose une moyenne locale en puissance sur un petit espace. L'outil expérimental doit donc être à même d'effectuer des mesures sur un petit périmètre, sans intervention d'un opérateur, en raison de l'interaction possible avec l'antenne et son diagramme, sujet qui mérite en lui-même d'ailleurs d'être considéré et traité (la solution retenue dans [5], et que nous avons suivi, utilise un plateau tournant),

- l'évolution des pertes de pénétration en fonction de la fréquence étant mal connue (paragraphe II-6), il est important de disposer d'un équipement fonctionnant à plusieurs fréquences.

- il est utile de disposer d'un équipement permettant de positionner l'antenne d'émission à différentes altitudes (mat télescopique par exemple), ceci afin d'étudier les effets liés à la hauteur de l'antenne d'émission.

V Conclusions

Une bonne connaissance des pertes dues à la pénétration d'une onde radioélectrique dans un bâtiment est essentielle pour les opérateurs de système de communication radiomobiles se proposant d'offrir des services à l'intérieur de locaux depuis des stations de base installées à l'extérieur. Inversement d'ailleurs, il est utile de connaître la puissance rayonnée depuis l'intérieur de bâtiments vers l'extérieur par des réseaux internes (PABX sans fil), en raison des possibles interférences qui pourraient survenir avec les réseaux extérieurs.

Malgré cela, il faut bien constater qu'aux fréquences qui nous intéressent, les résultats expérimentaux publiés sont très peu nombreux puisque nous n'avons pu recensé que 27 références bibliographique, rapportant 18 expériences (la plupart émanant de l'action COST 231 à laquelle participe activement le CNET). De plus, en raison de la dispersion des résultats rapportés, il serait prématuré de les considérer comme fiables.

Toutefois, à titre indicatif, et dans l'attente d'une meilleure validation, il est possible de proposer les éléments de réponse suivants :

- la technique qui semble aujourd'hui appropriée à la définition et à la mesure des pertes par pénétration est celle préconisée par Rice : d'une part elle est la plus simple de mise en oeuvre sur le plan expérimental, d'autre part elle autorisera des résultats plus rapides puisqu'elle permettra de compléter les modèles statistiques existants destiné au contexte cellulaire d'un terme de pénétration, plutôt que de partir de zéro dans ce nouveau contexte,

- pour la bande de fréquences 900-3000 MHz, et tous résultats confondus, et suivant cette définition, les pertes rapportées vont de 0,4 à 29 dB,

- le type de construction influe sur la valeur des pertes dites de pénétration, ainsi que le type de matériaux de construction. Pour des immeubles de bureaux, qui présentent peut-être un intérêt particulier, les pertes observées se situent le plus généralement entre 3 et 18,9 dB,

- le type et la taille des ouvrants sont d'une importance capitale. On constate en effet, pour des mêmes matériaux, une diminution des pertes de l'ordre de 2 à 6 dB lorsque le mur présente des fenêtres,

- la perte par pénétration est d'autant plus réduite que l'étage est élevé, le "gain par étage" correspondant serait d'environ 2 dB.

En revanche, un certain nombre de zones d'ombre subsistent :

- les effets de la hauteur de l'antenne de base sont mal connus,
- l'orientation de l'antenne de base vis-à-vis du bâtiment où se trouve le mobile présente vraisemblablement une influence (6 dB de différence ont été

observés pour deux bâtiments de même type mais d'orientation différente vis à vis du site de base), mais les lois générales relatives à cet effet restent à établir,

- enfin, concernant l'important effet de la fréquence, il est seulement possible de constater que des résultats diamétralement opposés ont été rapportés, certains annonçant une diminution des pertes lorsque la fréquence augmentait, alors que d'autres observaient au contraire une augmentation.

En conséquence, les études à entreprendre à court terme doivent s'attacher à compléter les méthodes de prévision statistiques existantes d'un terme de pénétration. Il faudrait en ce sens privilégier la collecte de données abondantes suivant la définition de Rice (c'est à dire mesurant la différence entre les affaiblissements relevés à l'extérieur au niveau du sol et à l'intérieur).

Dans une perspective un peu plus éloignée, les études devront s'attacher à une réelle compréhension des phénomènes, pouvant conduire à des modélisations physiques plus fiables.

Enfin on ne saurait conclure une telle note sans parler des implications des chiffres qui viennent d'être rassemblés, pour l'opérateur en charge de mettre en place les services de communications mobiles.

Résumée en quelques lignes, la question qui nous paraît se poser est la suivante : d'une part sera-t-il possible rapidement (c'est à dire dès que les terminaux portables connaîtront un certain développement), d'affirmer que l'offre de service s'étend à l'intérieur des bureaux, des habitations et autres locaux, et d'autre part quelles mesures devront être prises en ce sens en matière d'ingénierie radioélectrique ?

Il est clair qu'il est trop tôt pour nous puissions apporter une réponse précise. Cependant il est des faits simples utiles à rappeler.

En premier lieu l'affaiblissement de propagation en milieu urbain suit approximativement une loi en $1/d^a$, avec a de l'ordre de 4. Il en résulte que sur la partie centrale d'une cellule, et sur la moitié de sa surface, existe nécessairement une marge d'affaiblissement de l'ordre de 6 dB (par rapport au champ en "bord" de cellule), marge qui peut servir à la pénétration, mais dont la valeur comparée aux chiffres qui viennent d'être rapportés paraît un peu faible.

En second lieu, lorsque dans un réseau cellulaire toutes les puissances transmises sont simultanément augmentées, d'une part l'ensemble des motifs cellulaires, des rapports signaux à interférents etc. sont inchangés, et d'autre part les puissances reçues sont toutes accrues permettant

éventuellement des communications "indoor". Si un tel procédé est inenvisageable économiquement pour des réseaux à grandes cellules, il deviendra plus réaliste au fur et à mesure que se développera le réseau et que la taille des cellules se réduira. Il s'agit sans doute là de la seule réponse à long terme au problème de la fourniture de service de radiocommunication cellulaire à l'intérieur des locaux privés.

Bibliographie

- [1] Rice L. P. "Radio transmission into buildings at 35 and 150 MHz" Bell Syst. Tech. J., 38, n°1, pp. 197-210, January 1959.
- [2] Durante J.M. "Building penetration loss at 900 MHz" Conf. Proc., IEEE VTG Conf. 1973, pp. 1-7.
- [3] Ruiz Boqué S., Ballart M., Clua C., Agusti Comes R. "Loss factors inside buildings" COST 231 TD (91) 43
- [4] Sandén M. "Building penetration loss measurements in small cell environment". COST 231 TD(90) 121 Darmstadt December 1990.
- [5] Backman P., Lidbrink S., Ljunggren T. " Building penetration loss measurements at 1.7 GHz in microcellular environments". COST 231 TD(90) 122 Darmstadt December 1990.
- [6] Turkmani A.M.D., Parsons J.D., Lewis D.G. "Measurment of buildings penetration loss on radio signals at 441, 900 and 1400 MHz" Journal of the institution of electronic and radio engineers, Vol. 58, N° 6 (Supplement) pp.S169-S174, September-December 1988.
- [7] CSELT Italy "Radio-Wave propagation within buildings", COST 231 TD(89) 12
- [8] Motley, A.J. Keenan, J.M.P. [1988] "Personal communication radio coverage in buildings at 900 Mhz and 1700 Mhz" Electronics Letters 9th June 1988 Vol.24 N°12
- [9] Owen, F.C. Pudney, C.D. [1989] "Radio propagation for digital telephones at 1700 MHz and 900 MHz" Electronique Letters 5th January 1989 Vol.25 N°1
- [10] Keenan J.M., Motley A.J., "Radio coverage in buildings", BSTJ, Vol.8, N°1, Jan 1990, page 19-24
- [11] "Propagation penetration losses" COST 231 TD(91) 116 Rev.1. Florence JAN 22-24 1991.
- [12] I.T. Johnson, W. Johnson and F.J. Kelly, "CW and digital propagation behaviour from outdoor public cells measured in customer premises cells", COST 231 TD(90) 82.
- [13] Walker E.H. "Penetration of radio signals into buildingd in the cellular radio environment" B.S.T.J. Vol. 62, N°9, pp.2719-2735, Nov.1983
- [14] CCIR Vol VIII-1982 Rapport 902 page 90-99

- [15] Turkmani A.M.D., Parsons J.D., De Toledo A.F. "Radio propagation into building at 1,8 GHz" COST 231 TD(90) 117 Darmstadt December 1990.
- [16] Cox D.C., Murray R.R., Norris A.W. "Measurment of 800 MHz Radio transmission into buildings with metallic walls" AT&T B.L.T.J., 62 (9), p.p. 2695-2716, Nov 1983
- [17] Cox D.C., Murray R.R., Norris A.W. "800 MHz attenuation measured in and around suburban houses" AT&T B.L.T.J., 63(6), pp.921-954, 1984.
- [18] Cox D.C., Murray R.R., Norris A.W. "Antenna height dependence of 800 MHz attenuation measured in houses", IEEE Trans. Vehicular Tech., 34(2), pp.108-115, 1985.
- [19] Hoffman H.H Cox D.C. "Attenuation of 900 MHz Radio Waves propagating into a metal building" IEEE Trans on antennas and propagation, Vol A.P. 30, N°4, July 1982
- [20] Horikoshi J., Tanaka K., Morinaga T. "1,2 GHz band wave propagation measurements in concrete buildings for indoor radio communications" IEEE Trans. Vol VT-35 N°4 November 1986 pp. 146-152.
- [21] Komura M., Hogihira T., and Ogasawara M."New radio paging system and its propagation characteristics", IEEE Trans. Vol. VT-26, N°4, November 1977, pp. 808-811.
- [22] Wells P. "The attenuation of UHF radio signals by houses" , IEEE Trans. on V.T., Vol. VT-26, N°4, Nov 1977.
- [23] Molkdar D. "A review of radio propagation into and within buildings" IEE proceedings, Part. H, Feb 91.
- [24] Wilkinson T. A. "A review of radio propagation into and within buildings" COST 231 TD(90) 85. (update).
- [25] Chia S.T.S. "1700 MHz Urban microcells and their coverage into buildings" ICAP 1991, pp. 504-507.
- [26] Benzair B., Renduchintala V.S.M., Smith H., Williams D.H. "Satellite paging experiments inside buildings" IEE 5th Int. Conf. on Mobile Radio and personal communications, University of Warwick, Dec 89, Conf Pub N°315, pp 75-78.
- [27] Camwel P.L., McRoy J.G. "Experimental results of in building anisotropic propagation at 835 MHz using leaky feeders and dipole antenna" IEEE MONTECH' 87 Conference, Montreal, Canada, 9-11 Nov 1987 pp 213-216.