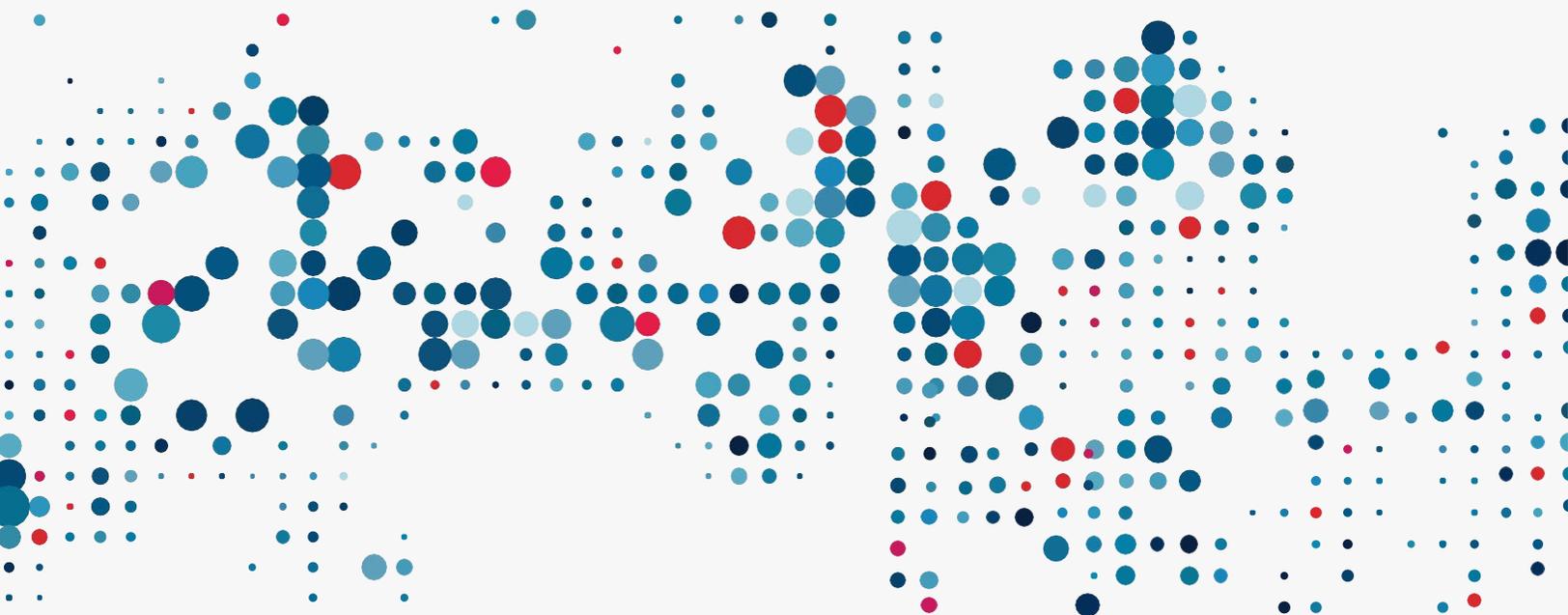


LIVRE BLANC

# Précision de la prédiction de conception d'iBwave

---

Vladan Jevremovic, PhD Ali  
Jemmali, PhD

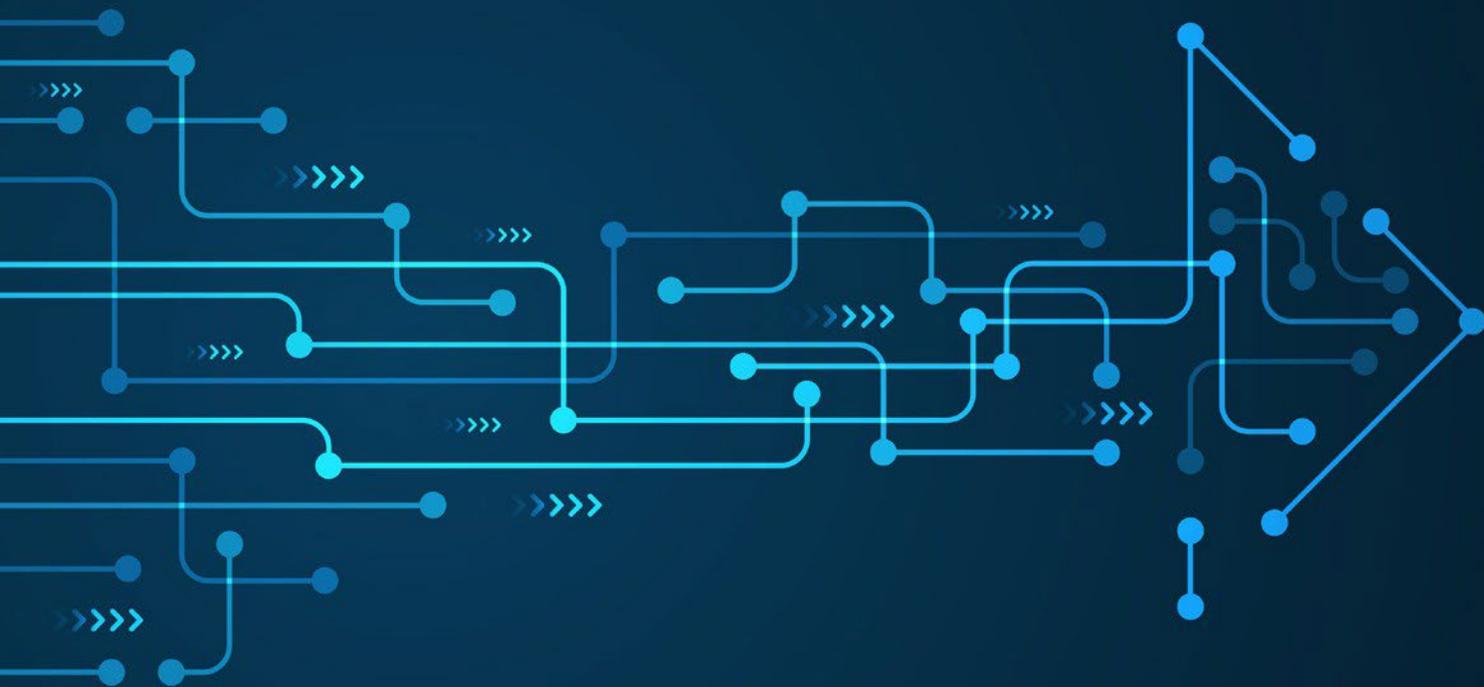


# Table des matières

|         |   |
|---------|---|
| 03..... | Champ d'application du document                                     |
| 04..... | Configuration des mesures et description du site                    |
| 04..... | Institut technologique de Monterrey - Campus de Queretaro (Mexique) |
| 11..... | Sites de Montréal (Canada)  |
| 13..... | Mall Bossa Nova (Brésil)  |
| 15..... | Bureau de Consultix (Égypte)  |
| 15..... | Prévision et résultats des mesures                                  |
| 15..... | 700 MHz   |
| 17..... | 850 MHz   |
| 21..... | 1900 MHz  |
| 24..... | 2100 MHz  |
| 28..... | 2400 MHz  |
| 31..... | 3200 MHz  |
| 33..... | 3500 MHz  |
| 33..... | 28 GHz  |
| 35..... | Analyse des données   |
| 37..... | Conclusion  |

# Champ d'application du document

Le module de prédiction RF d'iBwave Design est basé sur l'algorithme Fast Ray Tracing (FRT). Cet algorithme est complété par un module d'étalonnage, qui permet d'affiner les paramètres de propagation, la perte de pénétration des matériaux et les coefficients de réflexion. La comparaison des résultats du module avec les mesures prises sur le terrain dans divers lieux permet de valider au mieux la précision des modules de prédiction et d'étalonnage FRT. Pour quantifier les performances de l'algorithme FRT par défaut, non étalonné, une campagne de mesure des signaux en intérieur a été menée en Amérique du Nord, en Amérique centrale et en Amérique du Sud. Au total, 40 études ont été réalisées dans 8 bandes de fréquences sur 11 lieux. Le présent document décrit les lieux, la configuration des mesures, les résultats, les différences entre la couverture prédite et la couverture mesurée et discute de la précision de la prédiction.



# Mise en place des mesures et description du lieu

## Institut technologique de Monterrey - Campus de Querétaro (Mexique)

L'Institut de technologie et d'enseignement supérieur de Monterrey, également connu sous le nom de Tecnológico de Monterrey, est une université privée laïque et mixte basée à Monterrey, au Mexique. Elle s'est développée pour inclure 35 campus dans tout le pays et est largement reconnue comme l'une des universités les plus prestigieuses d'Amérique latine. Le campus de Querétaro se trouve au centre du pays, à environ 210 km au nord de Mexico. La ville est connue pour ses activités culturelles et ses bâtiments historiques, qui attirent chaque année des milliers de visiteurs du Mexique, d'Amérique latine, d'Amérique du Nord, d'Europe et d'Asie de l'Est. Le campus reflète également cette popularité, puisqu'il se classe parmi les deux premiers campus du pays en ce qui concerne le nombre d'étudiants étrangers inscrits. La figure 1 présente une carte du campus.

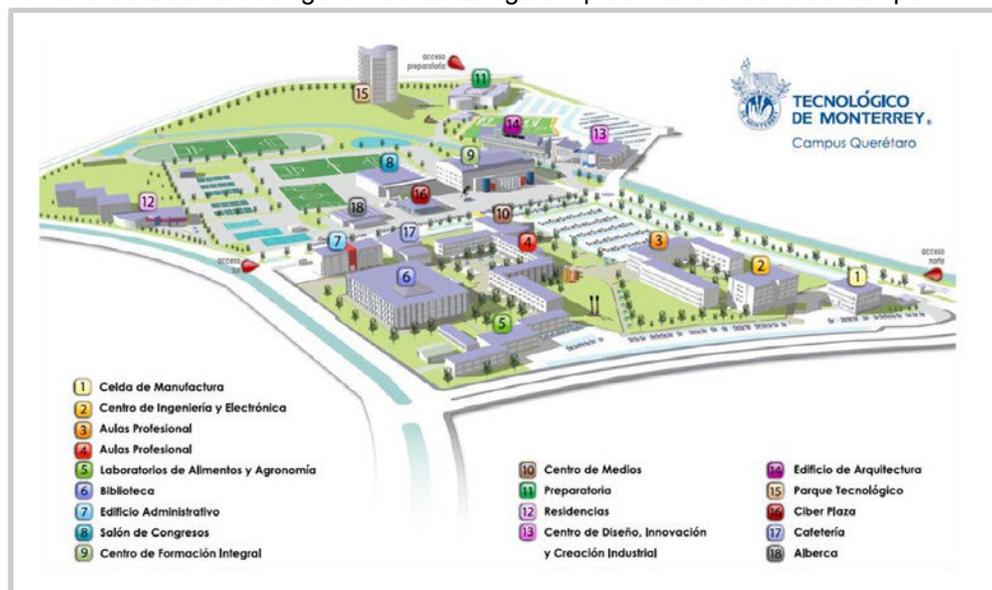


Figure 1 : Institut technologique de Monterrey, campus de Querétaro.

Des sondages par ondes continues (CW) ont été effectués dans les bâtiments suivants :

- Bâtiment 2 - Centre d'ingénierie et d'électronique (700, 850, 1900 & 2400 MHz)
- Bâtiment 5 - Agronomie, alimentation et sciences (850 MHz)
- Bâtiment 8 - Salle des congrès (1900 MHz)
- Bâtiment 9 - Centre de formation complète (850, 1900, 2400, 3200 MHz)
- Bâtiment 10 - Media Center (700, 850, 1900, 2400 MHz)
- Bâtiment 11 - Préparatoire (850 MHz et 1900 MHz)

L'équipement de mesure suivant a été utilisé dans tous les lieux :

- Générateur de signaux CW Rohde and Schwarz SMB100A, 9 kHz - 3,2 GHz, puissance maximale de 30 dBm (émetteur)
- Générateur de signaux CW Hameg HM8134-3M 1 Hz - 1.2 GHz 13 dBm max power (Transmitter)

- Kathrein antenne intérieure tri-bande omnidirectionnelle, numéro de pièce 741-592, cellulaire, PCS et Bande AWS
- Antenne d'intérieur tri-bande directionnelle Kathrein, référence 742-149, bande cellulaire, PCS et AWS
- Kathrein wide-band directional transmit indoor antenna, part number 78712313, 698-2700 MHz
- Antenne fouet de réception omnidirectionnelle à double bande, 850/1900 MHz, gain de 0 dBi
- Scanner radio bi-bande PCTEL SeeGull LX, 850/1900 MHz (Récepteur)
- Logiciel de collecte de données PCTEL Insite v3.1.0.19
- Trépied pour l'antenne d'émission

## Bâtiment 2 - Centre d'ingénierie et d'électronique

Le bâtiment du Centre d'ingénierie et d'électronique est situé sur le côté nord du campus. Les murs intérieurs sont principalement constitués de cloisons sèches, tandis que les murs extérieurs sont en béton. Les relevés ont été effectués à 700, 850 et 2400 MHz au niveau 2, où se trouvent divers laboratoires d'électronique et d'électrotechnique. Le relevé à 1900 MHz a été effectué au niveau 3, où les membres des facultés des départements de mécanique, d'électronique et d'informatique ont des bureaux.



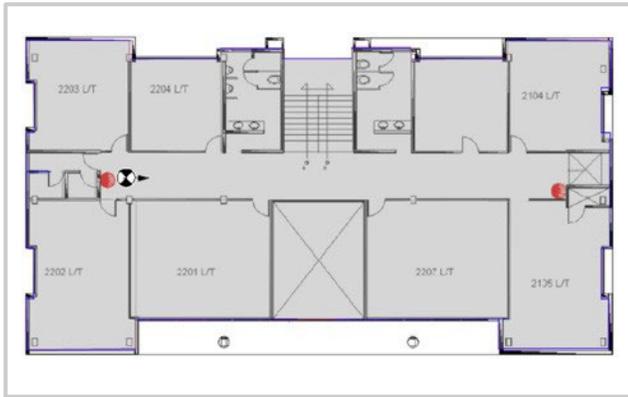
**Figure 2 :**  
Bâtiment 2 extérieur.



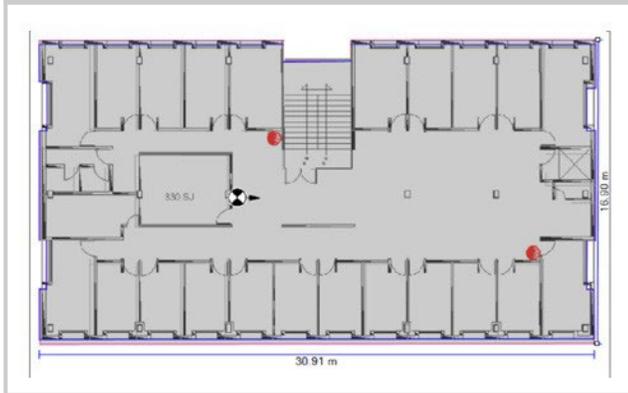
**Figure 3 :** Niveau 2 intérieur et configuration de la mesure (700, 850 & 2400 MHz).



**Figure 4 :** Intérieur de niveau 3 et configuration des mesures (1900 MHz).



**Figure 5 :** Plan du niveau 2 et emplacement de l'antenne directionnelle.



**Figure 6 :** Plan du niveau 3 et emplacement de l'antenne directionnelle.

## Bâtiment 5 - Agronomie, alimentation et sciences

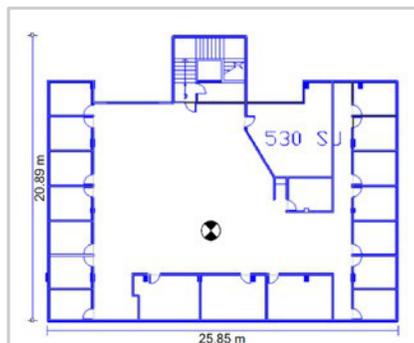
Le bâtiment 5 abrite des bureaux et des laboratoires pour l'alimentation, l'ingénierie, la biotechnologie, l'agronomie et la science. L'étude 850 MHz a été réalisée au troisième niveau, qui n'est occupé que par des bureaux. Les murs entre les bureaux sont en plâtre, tandis que les murs extérieurs sont en béton.



**Figure 7 :** Extérieur du bâtiment 5 et intérieur du niveau 3.



**Figure 8 :** Configuration de la mesure.



**Figure 9 :** Plan de niveau 3 et emplacement de l'antenne omnidirectionnelle.

## Bâtiment 8 - Salle des congrès

Le bâtiment 8 est un bâtiment de conférences et d'événements utilisé pour des événements majeurs, y compris les cérémonies de remise des diplômes. Les murs extérieurs sont en béton, tandis que les murs des trois salles de conférence sont en bois.

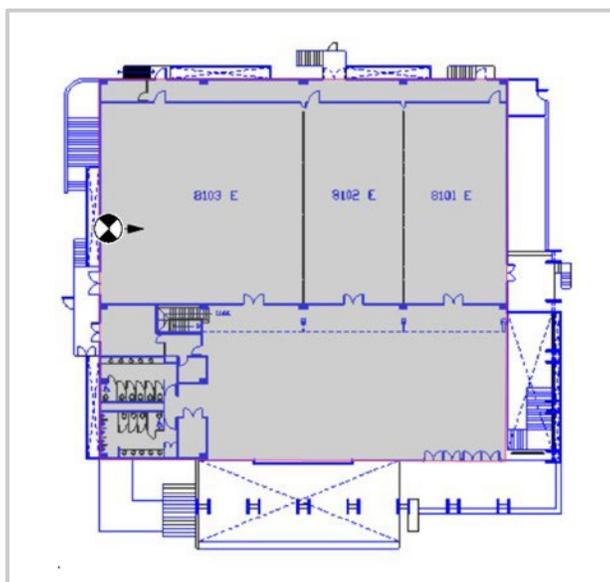
bois recouvert de tissu. Les autres murs intérieurs sont en plâtre. Le relevé de 1900 MHz a été effectué à l'aide d'une antenne directionnelle au niveau 1.



**Figure 10 :**  
Bâtiment 8 extérieur.



**Figure 11 :**  
Bâtiment 8 Niveau 1 intérieur.



**Figure 12 :**  
Plan du bâtiment 8 niveau 1 et  
emplacement de l'antenne directionnelle.

## Bâtiment 9 - Centre de formation polyvalent

Le Comprehensive Training Center est un bâtiment polyvalent dont le premier niveau abrite le gymnase et l'auditorium de l'université. L'auditorium est utilisé pour les cérémonies de remise des diplômes, les matchs de basket-ball et de volley-ball. Une partie du troisième niveau comprend des sièges pour les spectateurs. Le rez-de-chaussée, où l'étude sur les 850 MHz a été menée, comprend des salles de classe et des salles de danse.



**Figure 13 :**  
Bâtiment 9 extérieur.



**Figure 14 :**  
Bâtiment 9 Intérieur du sous-sol et configuration des mesures.

Un autre sondage à 850 MHz et plusieurs sondages à 3200 MHz ont été effectués au niveau 2 :

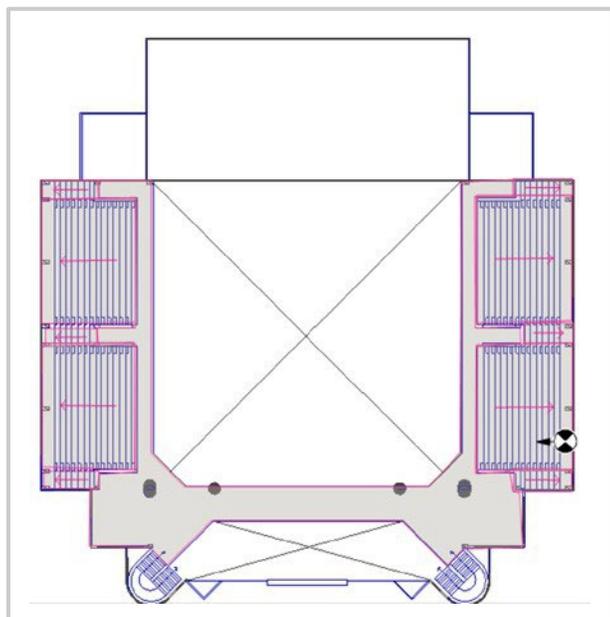


**Figure 15 :**  
Bâtiment 9 Niveau 2 et configuration des mesures.



**Figure 16 :**  
Bâtiment 9 Niveau du sous-sol et emplacement de l'antenne du niveau 2.

Une autre série de mesures à 1900 et 2400 MHz a été effectuée au niveau 3, là où se trouvent les sièges des spectateurs. L'antenne directionnelle se trouve au-dessus de la dernière rangée et pointe vers le bas à un angle de 45 degrés.



**Figure 17 :**  
Emplacement de l'antenne de niveau 3 du bâtiment 9.

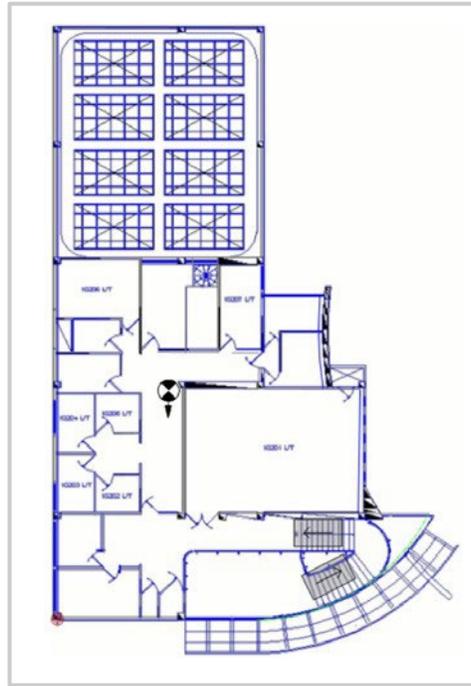
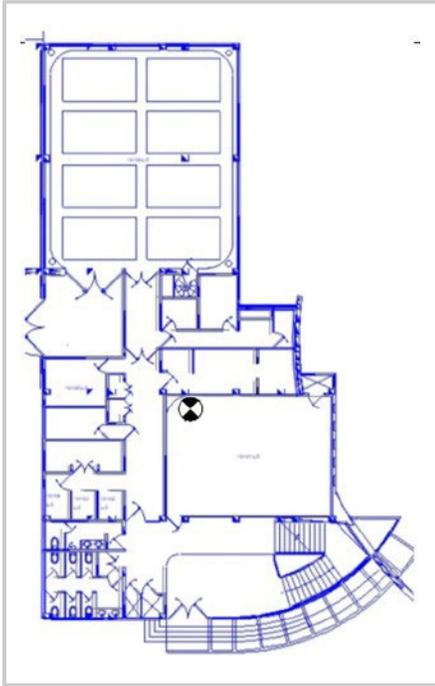
## Bâtiment 10 - Médiathèque

Le bâtiment 10 est un centre des médias qui dispose d'équipements pour les interviews radio, les postes de télévision et la conception d'œuvres d'art numériques, et des laboratoires de création. Les murs extérieurs sont en blocs de béton et la plupart des pièces ont des murs en plaques de plâtre, à l'exception des deux studios dont les murs sont en fibre de verre. Les murs des avant et la plupart des portes de chaque pièce sont en verre épais. Des études CW ont été menées à 700, 850 et 2400 MHz, au niveau 1, et à 1900 MHz au niveau 2.



**Figure 18 :**  
Bâtiment 10 Niveau 1 intérieur et configuration des mesures.

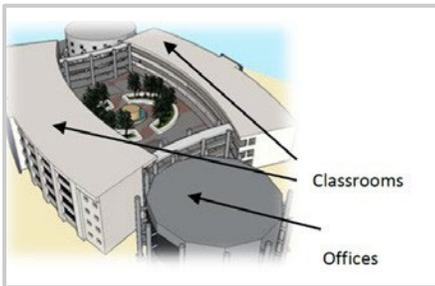
**Figure 19 :**  
Bâtiment 10 Niveau 2 intérieur et configuration des mesures.



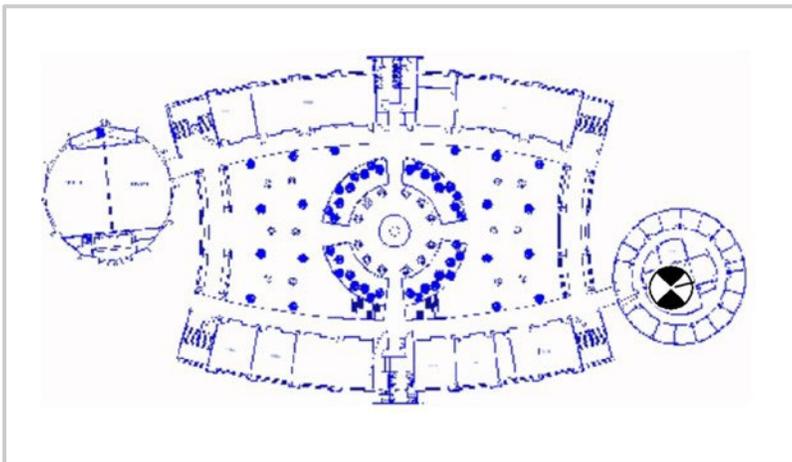
**Figure 20 :**  
Bâtiment 10 niveaux 1 et 2 avec  
emplacement des antennes.

### Bâtiment 11 - Préparatoire

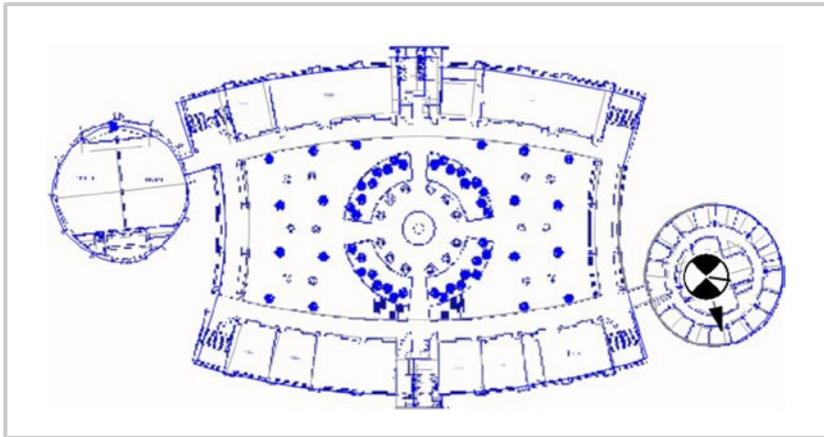
Le bâtiment 11 est un mélange de salles de classe et de bureaux de professeurs. Il se trouve en face du bâtiment CIE (bâtiment 2), comme le montre le plan ci-dessous. Ce bâtiment possède des structures cylindriques où se trouvent les bureaux de la faculté. La plupart des murs du bâtiment sont en béton, à l'exception des murs des bureaux, qui sont en plâtre. Des études à 850 et 1900 MHz ont été menées aux niveaux 1 et 2 de ce bâtiment.



**Figure 21 :**  
Bâtiment 11 : extérieur,  
intérieur et mesures.



**Figure 22 :**  
Plan du bâtiment 11 niveau 1 avec  
emplacement de l'antenne  
omnidirectionnelle.



**Figure 23 :**  
Plan du bâtiment 11 niveau 2  
avec emplacement de l'antenne  
directionnelle.

## Sites de Montréal (Canada)

Les lieux où les enquêtes ont été menées à Montréal sont les suivants :

- Stade de hockey de la LNH
- Rockland Center (centre commercial)
- Ancien siège d'iBwave

Pour les trois sites, la campagne de mesures CW a été menée à l'aide de l'équipement de mesure suivant :

- InvexNxG iSend (émetteur de test)
- Antenne d'émission directionnelle Andrew Cellmax D-25
- Antenne d'émission omnidirectionnelle Andrew Cellmax O-25
- Antenne de réception omnidirectionnelle à fouet
- InvexNxG iScan (récepteur)
- Outil logiciel de collecte de données Invex3g In-Building
- Trépied pour l'antenne d'émission

### Bell Center (stade de la LNH)

Le Centre Bell est un stade couvert de 20 000 places et d'une superficie d'environ 15 500 mètres carrés (100 m x 155 m). Elle est principalement utilisée pour des matchs de hockey professionnel, mais aussi pour des spectacles et des événements commerciaux. À l'intérieur de l'arène, les places assises sont réparties sur 7 niveaux. Sur le site, une salle d'exposition et une salle de conférence sont à disposition des visiteurs.

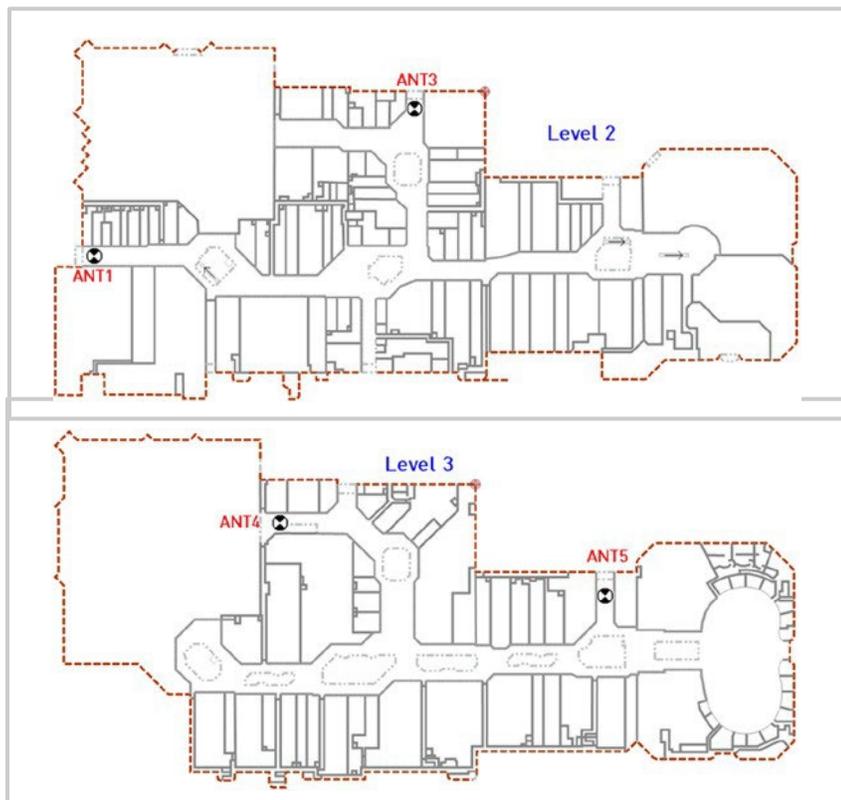
Une antenne omnidirectionnelle a été utilisée à trois endroits différents, appelés antennes 1, 2 et 3. L'antenne 1 a été placée au niveau 2B et 5 séries de données CW ont été enregistrées au niveau 2B. L'antenne 2 a été placée au niveau 1 et 5 séries de données CW ont été enregistrées au niveau 1 et au niveau 2B. L'antenne 3 a été placée au niveau 7 et 2 séries de données CW ont été enregistrées au niveau 2B. Le résumé de toutes les antennes et de toutes les séries de données est présenté dans le tableau suivant :

| ANTENNE   | POSITION DE L'ANTENNE | TRACE D'ENQUÊTE         | PLACEMENT DE L'ENQUÊTE |
|-----------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| Antenne 1 | Niveau 2B             | Corridor                | Niveau 2B              |
|           |                       | Bol intérieur           | Niveau 2B              |
| Antenne 2 | Niveau 1              | Les coulisses           | Niveau 1               |
|           |                       | Retour en coulisses     | Niveau 1               |
|           |                       | Vestiaire des visiteurs | Niveau 1               |
|           |                       | Bol intérieur           | Niveau 2B              |
| Antenne 3 | Niveau 7              | Bol intérieur           | Niveau 2B              |
|           |                       | Corridor                | Niveau 2B              |

**Tableau 1 :**  
Configuration de la mesure au hockey Arène.

## Centre Rockland

Le Rockland Center est un grand centre commercial à trois niveaux d'une superficie d'environ 37 000 mètres carrés (environ 310 m x 120 m). Dans ce centre, nous avons utilisé une antenne omnidirectionnelle à quatre endroits différents. L'antenne 1 a été placée au niveau 2, L'antenne 3 a été placée au même niveau que l'antenne 1, mais à un autre endroit, et quatre séries de données OC ont été enregistrées aux niveaux 2 et 3. L'antenne 4 a été placée au niveau 3, où deux séries de données OC ont été prises. Enfin, l'antenne 5 a également été placée au niveau 3, mais à un autre endroit, et quatre séries de données CW ont été enregistrées aux niveaux 2 et 3. L'emplacement des antennes est illustré dans les figures 21 et 22 ci-dessous :



**Figure 24 :**  
Antennes 1 et 3 à Rockland Center (Niveau 2).

**Figure 25 :**  
Antennes 4 et 5 à Rockland Center (Niveau 3).

## Ancien siège d'iBwave

L'ancien bureau du siège d'iBwave est un lieu à un seul niveau avec une empreinte au sol d'environ 748 mètres carrés (approximativement 34m x 22m). Dans le bureau, une antenne omnidirectionnelle a été utilisée à trois endroits différents. Aux endroits 1, 2 et 3, la puissance d'émission de sortie était de 15 dBm, mais la puissance a été réduite à

-15 dBm à l'emplacement 4. Les emplacements 3 et 4 sont colocalisés et les différents niveaux de puissance ont été utilisés pour tester l'algorithme de prédiction lorsque la puissance d'émission est modifiée. L'emplacement des antennes est indiqué sur la figure suivante :

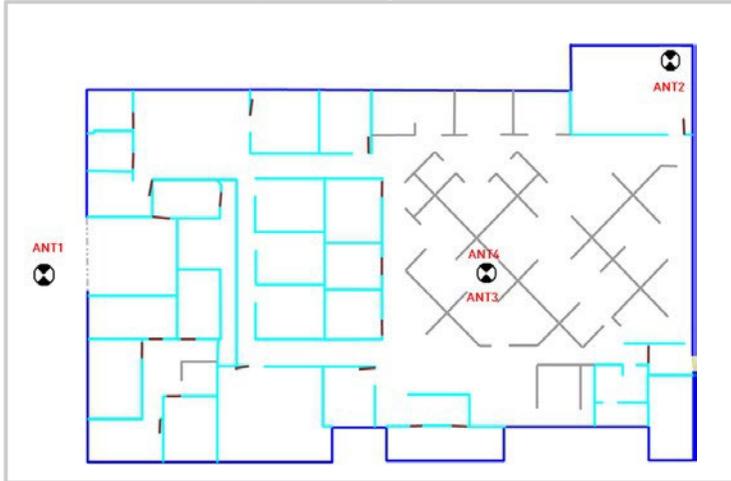


Figure 26 :  
Emplacement des antennes au siège d'iBwave.

## Bossa Nova Mall (Brésil)

QMC Telecom International est un important propriétaire, développeur et opérateur de systèmes DAS d'intérieur en Amérique latine. Il a déployé plus de 142 millions de mètres carrés de couverture et dispose d'une équipe d'ingénieurs internes expérimentés. Cette équipe a mis en œuvre avec succès plus de 10 000 systèmes DAS.

DAS dans le monde entier. Récemment, QMC a mené un essai de réseau 5G NR dans le centre commercial Bossa Nova au Brésil. Ce centre commercial fait partie d'un complexe hôtel/centre commercial rattaché à l'aéroport Santos Dumont de Rio de Janeiro. Le réseau d'essai fonctionnait dans un canal TDD de 100 MHz à 3,5 GHz. QMC Telecom a partagé les données de couverture d'un point d'irradiation situé dans l'aire de restauration au niveau Mezzanine :

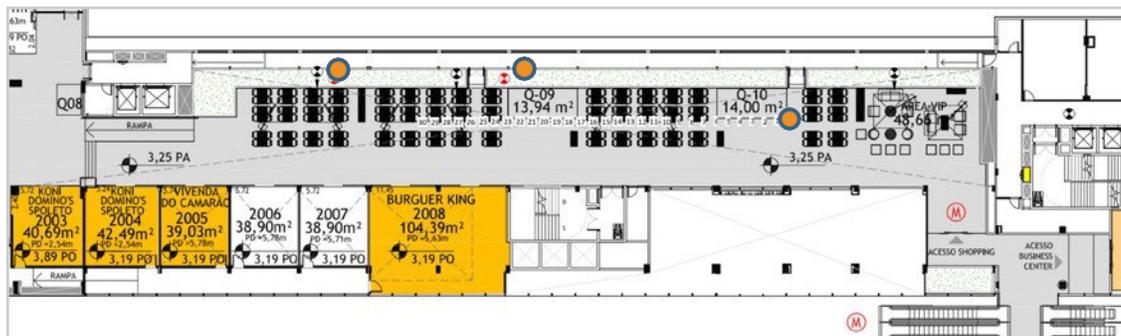


Figure 27 :  
Zone de restauration du centre commercial avec emplacement des points d'irradiation (niveau Mezzanine).

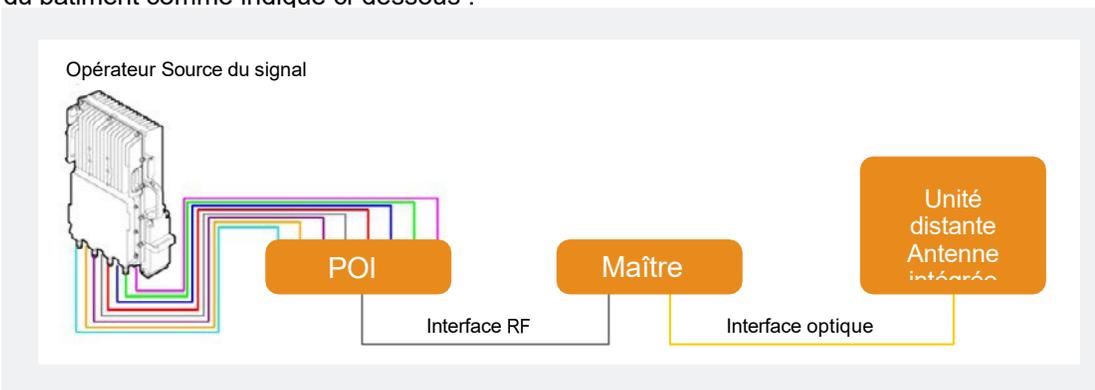


**Figure 28 :**  
Une photographie des points d'irradiation dans l'aire de restauration.



**Figure 29 :**  
Points d'irradiation tels qu'ils ont été modélisés dans iBwave Design..

La source du signal 5G NR est une unité radio distante MIMO 8x8, connectée au réseau du bâtiment comme indiqué ci-dessous :



**Figure 30 :**  
Réseau d'essai 5G NR schémas d'architecture.

Les données de l'enquête 5G NR RF ont été collectées à l'aide d'un téléphone Samsung Galaxy Z Fold4.

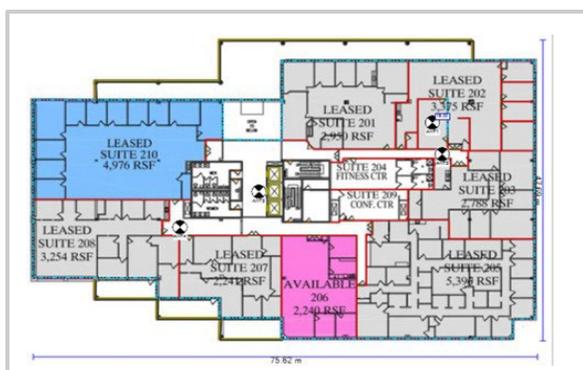
## Bureau Consultix (Égypte)

Ce relevé CW à 28 GHz a été effectué par Consultix, un équipementier spécialisé dans le matériel de relevé. Consultix a utilisé son propre émetteur CW et son propre scanner dans ses bureaux de New Cairo, en Egypte.

L'équipement suivant a été utilisé pour l'étude :

- Émetteur CW Consultix 5G DUO mmWave (28 GHz)
- Sage Antenne d'émission omnidirectionnelle
- Antenne de réception omnidirectionnelle
- Consultix Catalyst-40 Downconverter à 2,4 GHz
- 2.4 GHz scanner (récepteur)
- Logiciel de collecte de données dans les bâtiments Consultix WalkView
- Trépied d'une hauteur maximale de 2 m pour l'antenne d'émission

Dans le bâtiment, une antenne omnidirectionnelle a été placée à quatre endroits différents :



**Figure 31 :**  
Bureau Consultix avec 4 antennes  
Emplacements.

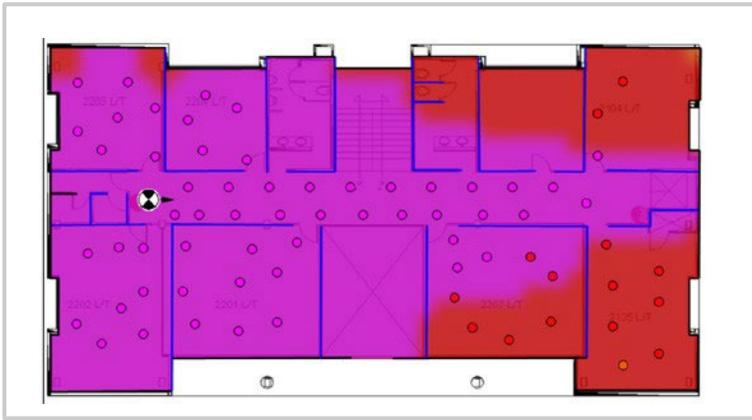
## Résultats des prédictions et des mesures

Pour comparer les données prédites et mesurées, la composante d'évanouissement rapide doit être éliminée en les "lissant" à partir des données de terrain. Les données d'évanouissement rapide ne sont pas souhaitables car elles contiennent des informations sur les trajets multiples de l'émetteur-récepteur, ce qui n'est pas le cas de la prédiction FRT. Le processus de moyennage ("lissage") de la composante d'évanouissement rapide peut être réalisé en définissant une "fenêtre" de moyennage de taille  $d$  (en mètres). À l'intérieur de la fenêtre, les données CW sont moyennées. La valeur moyennée se voit ensuite attribuer une coordonnée dans la fenêtre, et le processus est répété dans les fenêtres adjacentes. Ce processus est facilement réalisé dans le logiciel à l'aide d'un algorithme automatisé permettant de lisser les données de terrain.

### 700 MHz

#### Bâtiment 2

Au deuxième niveau du bâtiment 2, une étude de couverture CW à 700 MHz a été réalisée à l'aide d'une antenne directionnelle située au bout d'un long couloir qui relie plusieurs laboratoires. La figure suivante montre la prédiction de couverture FRT par défaut superposée à l'étude CW, avec une moyenne d'évanouissement rapide.



**Figure 32 :**  
Couverture CW prévue et mesurée à 700 MHz dans le bâtiment 2, niveau 2.

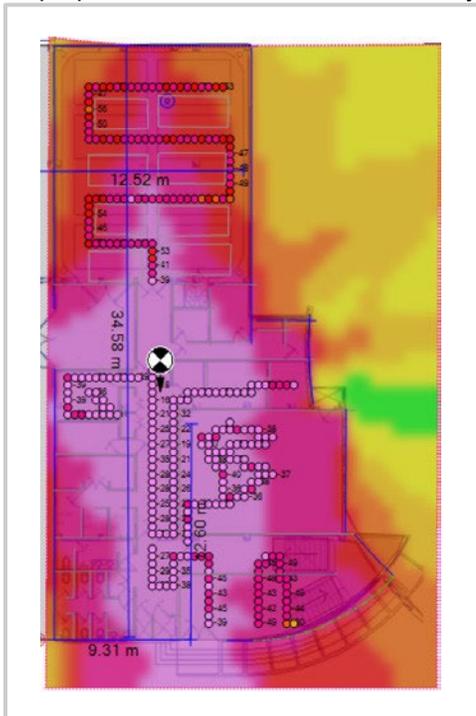
Le tableau suivant résume la précision des prédictions :

| Résumé de la prédiction par rapport aux données mesurées Valeur (dB) |       |
|--|-------|
| Erreur moyenne ( $\mu$ )   | -2.52 |
| Erreur moyenne absolue ( $\mu$ )                                     | 3.86  |
| Écart-type ( $\sigma$ )  | 3.79  |

**Tableau 2 :**  
Données prédites par rapport aux données mesurées : Bâtiment 2, niveau 2, 700 MHz.

## Bâtiment 10

Au premier niveau du bâtiment 10, une étude de couverture en ondes entretenues à 700 MHz a été réalisée à l'aide d'une antenne directionnelle située au milieu. La figure suivante montre la prédiction de couverture FRT par défaut superposée à l'étude CW, avec une moyenne d'évanouissement rapide.



**Figure 33 :**  
Couverture CW prévue et mesurée à 700 MHz dans le bâtiment 10, niveau 1.

Le tableau suivant résume la précision des prédictions :

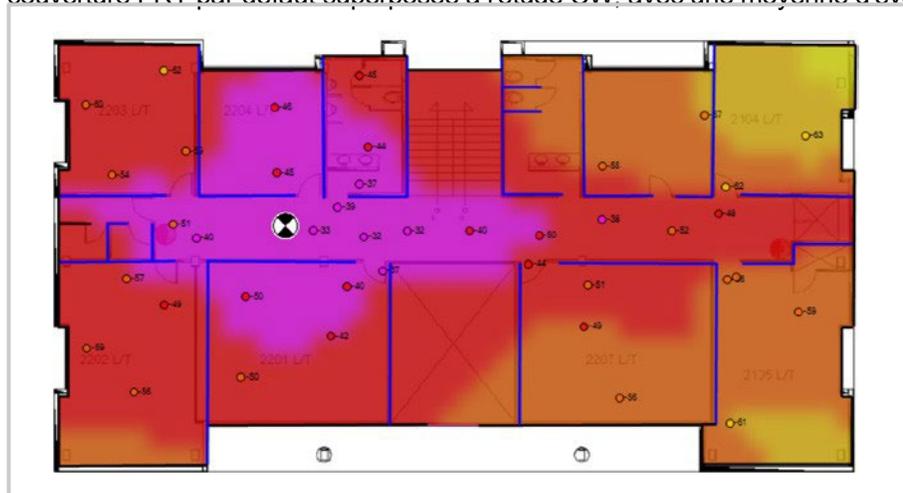
| Résumé de la prédiction par rapport aux données mesurées Valeur (dB) |       |
|--|-------|
| Erreur moyenne ( $\mu$ )   | -2.35 |
| Erreur moyenne absolue ( $\mu$ )                                     | 4.86  |
| Écart-type ( $\sigma$ )  | 5.89  |

**Tableau 3 :**  
Données prédites par rapport aux données mesurées : Bâtiment 10, niveau 1, 700 MHz.

## 850 MHz

### Bâtiment 2

Au troisième niveau du bâtiment 2, une étude de couverture CW à 850 MHz a été réalisée à l'aide d'une antenne omnidirectionnelle située sur le côté gauche du couloir principal. La figure suivante montre la prédiction de couverture FRT par défaut superposée à l'étude CW, avec une moyenne d'évanouissement rapide.



**Figure 34 :**  
Couverture CW prévue et mesurée dans le bâtiment 2, niveau 3.

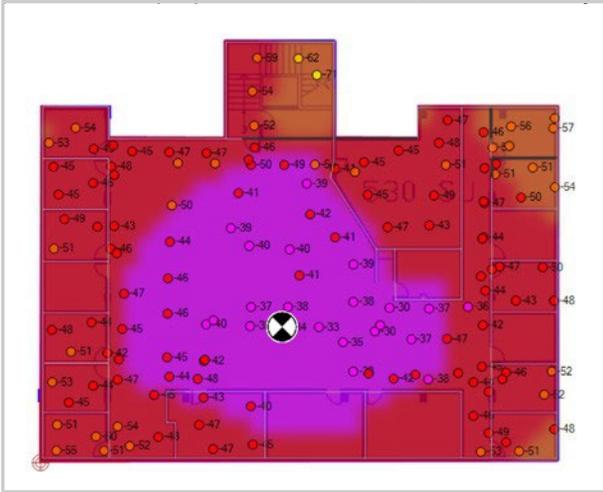
Le tableau suivant résume la précision des prédictions :

| Résumé de la prédiction par rapport aux données mesurées Valeur (dB) |       |
|--|-------|
| Erreur moyenne ( $\mu$ )   | -6.15 |
| Erreur moyenne absolue ( $\mu$ )                                     | 6.74  |
| Écart-type ( $\sigma$ )  | 5.66  |

**Tableau 4 :**  
Données prédites par rapport aux données mesurées : Bâtiment 2, niveau 3, 850 MHz.

## Bâtiment 5

Au troisième niveau du bâtiment 5, une étude de couverture en ondes entretenues à 850 MHz a été réalisée à l'aide d'une antenne omnidirectionnelle située près du centre. La figure suivante montre la prédiction de couverture FRT par défaut superposée à l'étude CW, avec une moyenne d'évanouissement rapide.



**Figure 35 :**  
Couverture CW prévue et mesurée dans le bâtiment 5, niveau 3.

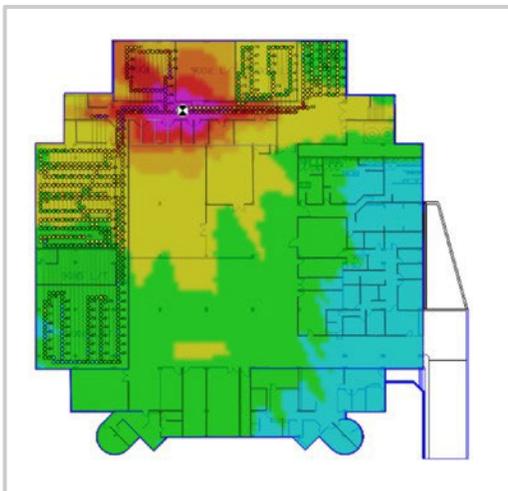
Le tableau suivant résume la précision des prédictions :

| Résumé de la prédiction par rapport aux données mesurées Valeur (dB) |       |
|--|-------|
| Erreur moyenne ( $\mu$ )   | -3.51 |
| Erreur moyenne absolue ( $\mu$ )                                     | 4.43  |
| Écart-type ( $\sigma$ )  | 4.17  |

**Tableau 5 :**  
Données prédites par rapport aux données mesurées : Bâtiment 5, niveau 3, 850 MHz.

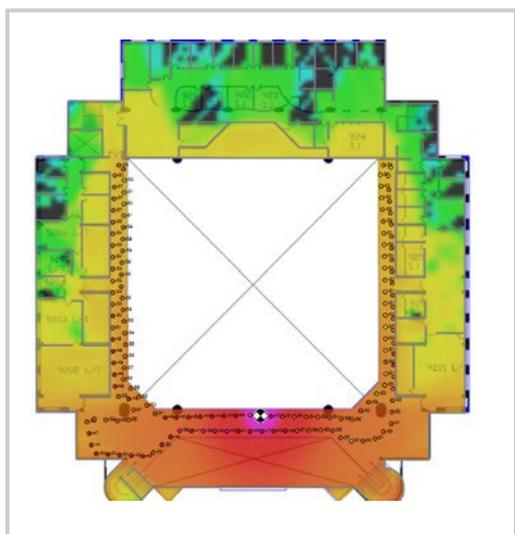
## Bâtiment 9

Au sous-sol du bâtiment 9, une étude de couverture CW à 850 MHz a été réalisée à l'aide d'une antenne omnidirectionnelle située dans le couloir. La figure suivante montre la prédiction de couverture FRT par défaut superposée à l'étude CW, avec une moyenne d'évanouissement rapide.



**Figure 36 :**  
Couverture CW prévue et mesurée dans le bâtiment 9, niveau 3.

Un autre sondage à 850 MHz a été effectué au niveau 2 :



**Figure 37 :**  
Couverture CW prévue et mesurée dans le bâtiment 9, niveau 2.

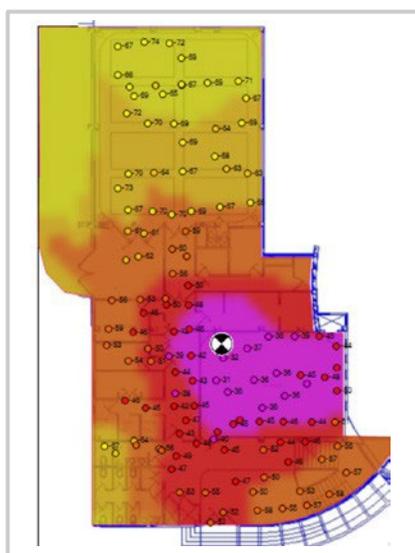
Le tableau suivant résume la précision des prévisions au bâtiment 9, 850 MHz :

|          | ERREUR MOYENNE | ABS ERREUR MOYENNE | STD DEV |
|----------|----------------|--------------------|---------|
| Sous-sol | -0.87          | 4.93               | 6.64    |
| Niveau 2 | 1.30           | 4.58               | 5.53    |

**Tableau 6 :**  
Comparaison entre les données prédites et les données mesurées au bâtiment 9, 850 MHz.

## Bâtiment 10

Au premier niveau du bâtiment 10, une étude de couverture en ondes entretenues à 850 MHz a été réalisée à l'aide d'une antenne omnidirectionnelle située près du centre. La figure suivante montre la prédiction de couverture FRT par défaut superposée à l'étude CW, avec une moyenne d'évanouissement rapide.



**Figure 38 :**  
Couverture CW prévue et mesurée dans le bâtiment 10, niveau 1.

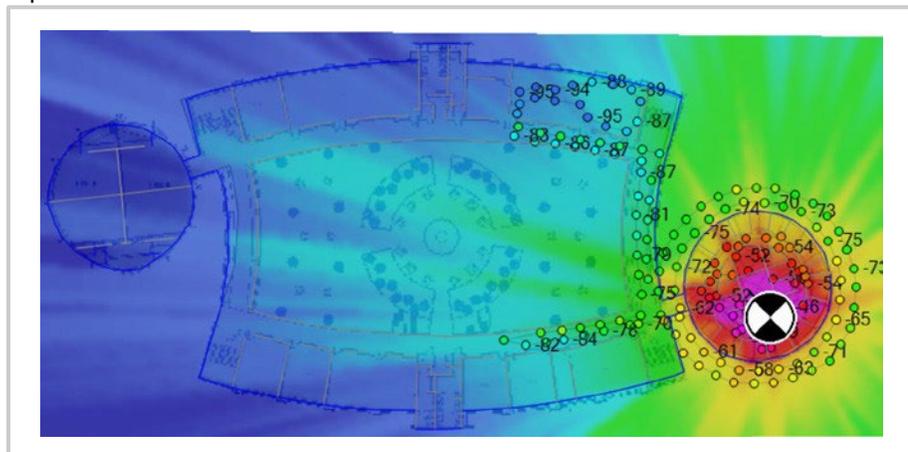
Le tableau suivant résume la précision de la prédiction pour le bâtiment à 850 MHz :

| Résumé de la prédiction par rapport aux données mesurées Valeur (dB) |       |
|--|-------|
| Erreur moyenne ( $\mu$ )   | -3.37 |
| Erreur moyenne absolue ( $\mu$ )                                     | 4.36  |
| Écart-type ( $\sigma$ )  | 4.02  |

**Tableau 7 :**  
Données prédites par rapport aux données mesurées : Bâtiment 10, niveau 1.

## Bâtiment 11

Au premier niveau du bâtiment 11, une étude de couverture CW à 850 MHz a été réalisée à l'aide d'une antenne omnidirectionnelle située près du centre de la structure ovale où se trouvent les bureaux de la faculté. Comme il s'agit du premier niveau, certaines données ont été recueillies juste à l'extérieur des murs. La figure suivante montre la prédiction de couverture FRT par défaut superposée à l'étude CW, avec une moyenne d'évanouissement rapide.



**Figure 39 :**  
Couverture CW prévue et mesurée dans le bâtiment 11, niveau 1.

Le tableau suivant résume la précision de la prédiction :

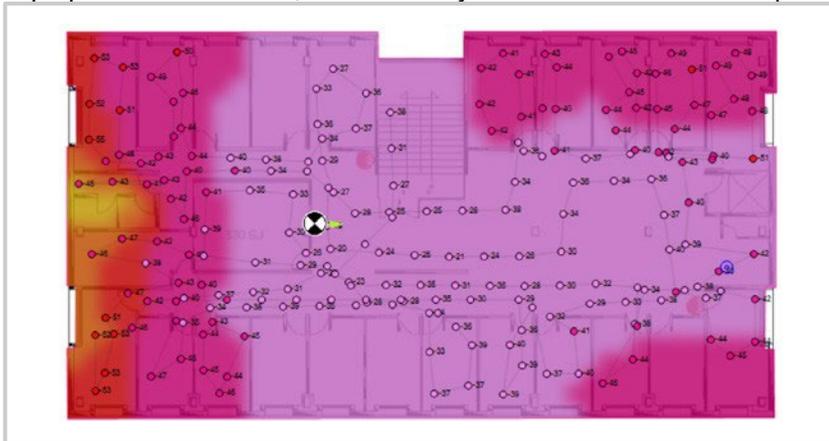
| Résumé de la prédiction par rapport aux données mesurées Valeur (dB) |       |
|--|-------|
| Erreur moyenne ( $\mu$ )   | -0.55 |
| Erreur moyenne absolue ( $\mu$ )                                     | 4.25  |
| Écart-type ( $\sigma$ )  | 5.18  |

**Tableau 8 :**  
Données prédites par rapport aux données mesurées : Bâtiment 11, niveau 1, 850 MHz.

## 1900 MHz

### Bâtiment 2

Au niveau 3 du bâtiment 2, une étude de couverture CW à 1900 MHz a été réalisée à l'aide d'une antenne directionnelle située près du centre. La figure suivante montre la prédiction de couverture FRT par défaut superposée à l'étude CW, avec une moyenne d'évanouissement rapide.



**Figure 40 :**  
Couverture CW prévue et mesurée dans le bâtiment 2, niveau 3.

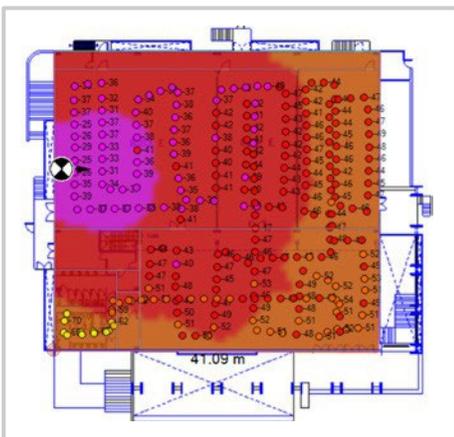
Le tableau suivant résume la précision de la prédiction :

| Résumé de la prédiction par rapport aux données mesurées Valeur (dB) |       |
|--|-------|
| Erreur moyenne ( $\mu$ )   | -3.05 |
| Erreur moyenne absolue ( $\mu$ )                                     | 5.51  |
| Écart-type ( $\sigma$ )  | 5.98  |

**Tableau 9 :**  
Données prédites par rapport aux données mesurées : Bâtiment 2, niveau 3, 1900 MHz.

### Bâtiment 8

Au premier niveau du bâtiment 8, une étude de couverture CW à 1900 MHz a été réalisée à l'aide d'une antenne directionnelle située près du mur extérieur d'une salle de réunion. La figure suivante montre la prédiction de couverture FRT par défaut superposée à l'étude CW, avec une moyenne d'évanouissement rapide.



**Figure 41 :**  
Couverture CW prévue et mesurée dans le bâtiment 8, niveau 1..

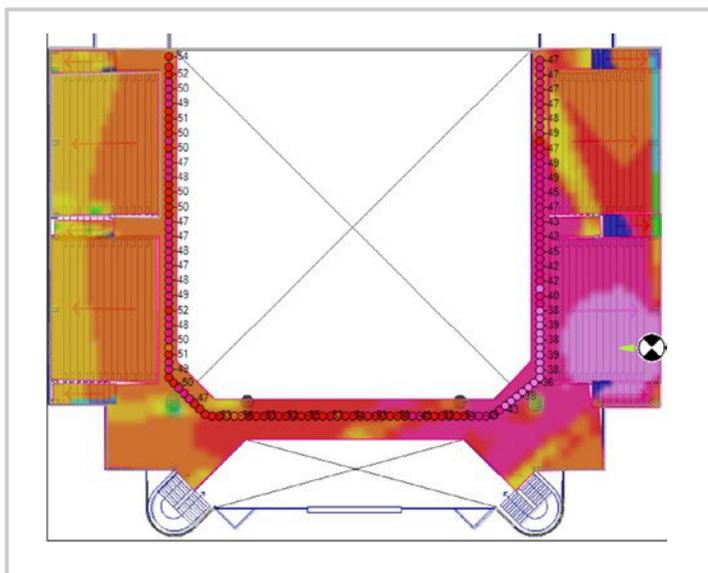
Le tableau suivant résume la précision de la prédiction :

| Résumé de la prédiction par rapport aux données mesurées Valeur (dB) |      |
|--|------|
| Erreur moyenne ( $\mu$ )   | 2.13 |
| Erreur moyenne absolue ( $\mu$ )                                     | 4.82 |
| Écart-type ( $\sigma$ )  | 5.78 |

**Tableau 10 :**  
Données prédites par rapport aux données mesurées : Bâtiment 8, niveau 1, 1900 MHz.

## Bâtiment 9

Au troisième niveau du bâtiment 9, une étude de couverture CW à 1900 MHz a été réalisée au bas de la zone des sièges des spectateurs. Une antenne directionnelle a été placée au-dessus de la dernière rangée et pointée vers le bas à un angle de 45 degrés. La figure suivante montre la prédiction de couverture FRT par défaut superposée à l'étude CW, avec l'évanouissement rapide supprimé.



**Figure 42 :**  
Couverture CW prévue et mesurée dans le bâtiment 9, niveau 3.

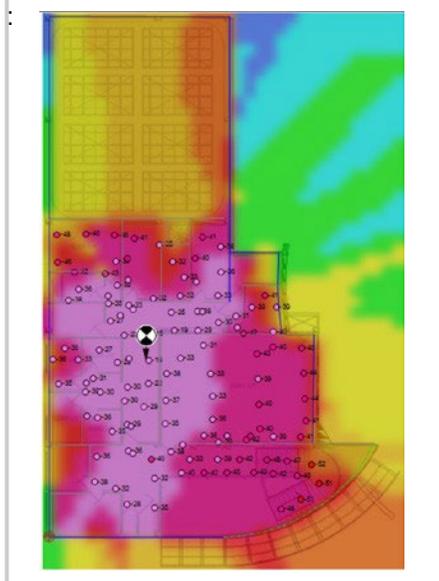
Le tableau suivant résume la précision de la prédiction :

| Résumé de la prédiction par rapport aux données mesurées Valeur (dB) |      |
|--|------|
| Erreur moyenne ( $\mu$ )   | 4.11 |
| Erreur moyenne absolue ( $\mu$ )                                     | 4.85 |
| Écart-type ( $\sigma$ )  | 4.37 |

**Tableau 11 :**  
Données prédites par rapport aux données mesurées : Bâtiment 9, niveau 3, 1900 MHz.

## Bâtiment 10

Au deuxième niveau du bâtiment 10, une étude de couverture CW à 1900 MHz a été réalisée à l'aide d'une antenne directionnelle dans un couloir proche du centre du plan d'étage. La figure suivante montre la prédiction de couverture FRT par défaut superposée à l'étude CW, avec l'évanouissement rapide supprimé



**Figure 43 :**  
Couverture CW prévue et mesurée dans le bâtiment 10, niveau 2.

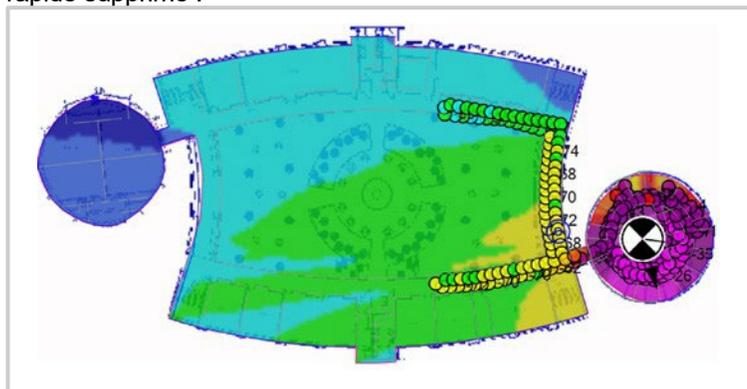
Le tableau suivant résume la précision de la prédiction :

| Résumé de la prédiction par rapport aux données mesurées Valeur (dB) |      |
|--|------|
| Erreur moyenne ( $\mu$ )   | 3.42 |
| Erreur moyenne absolue ( $\mu$ )                                     | 5.19 |
| Écart-type ( $\sigma$ )  | 6.40 |

**Tableau 12 :**  
Données prédites par rapport aux données mesurées : Bâtiment 10, niveau 2, 1900 MHz.

## Bâtiment 11

Au deuxième niveau du bâtiment 11, une étude de couverture CW à 1900 MHz a été réalisée à l'aide d'une antenne directionnelle située près du centre de la structure ovale où se trouvent les bureaux de la faculté. La figure suivante montre la prédiction de couverture FRT par défaut superposée à l'étude CW, avec l'évanouissement rapide supprimé :



**Figure 44 :**  
Couverture CW prévue et mesurée dans le bâtiment 11, niveau 2.

Le tableau suivant résume la précision de la prédiction :

| Résumé de la prédiction par rapport aux données mesurées Valeur (dB) |      |
|--|------|
| Erreur moyenne ( $\mu$ )   | 3.54 |
| Erreur moyenne absolue ( $\mu$ )                                     | 4.85 |
| Écart-type ( $\sigma$ )  | 4.90 |

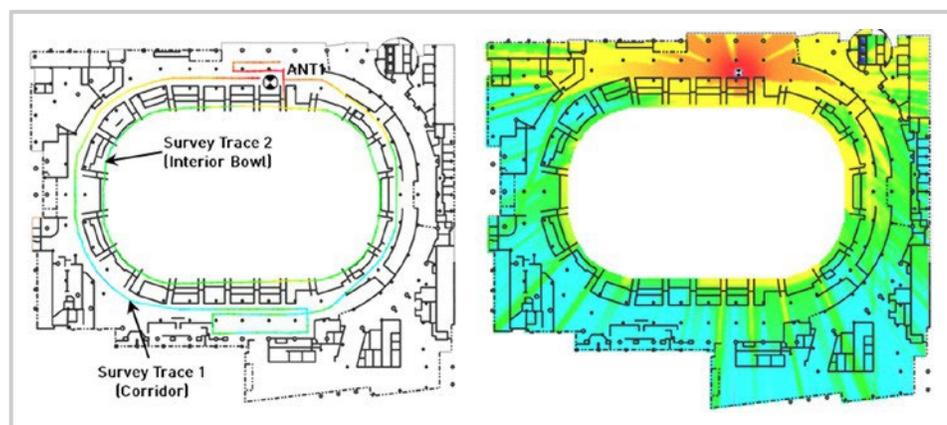
**Tableau 13 :**  
Données prédites par rapport aux données mesurées : Bâtiment 11, niveau 2, 1900 MHz.

## 2100 MHz

### Bell Center (NHL Arena)

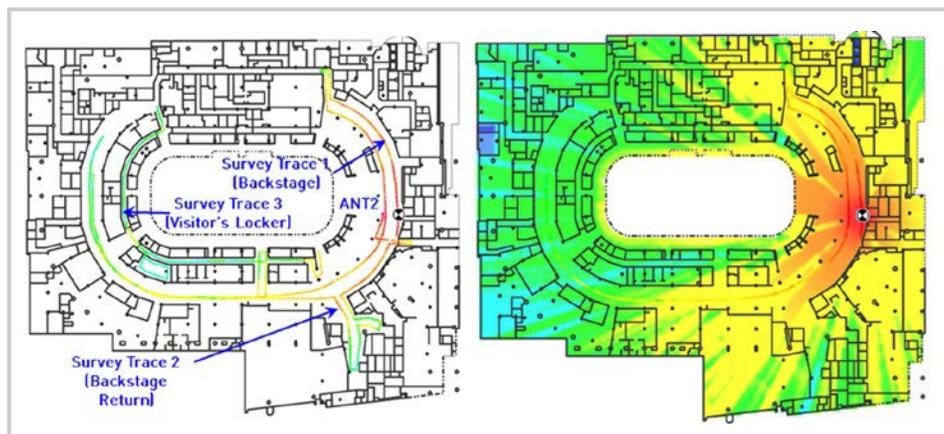
Dans les figures suivantes, nous présentons les données de l'enquête CW et les cartes de prédiction de la couverture FRT par défaut dans la zone de l'enquête CW et dans la zone de l'enquête FRT.

NHL arena. La figure 45 présente les mesures CW et la prédiction de couverture FRT par défaut au niveau 2B.



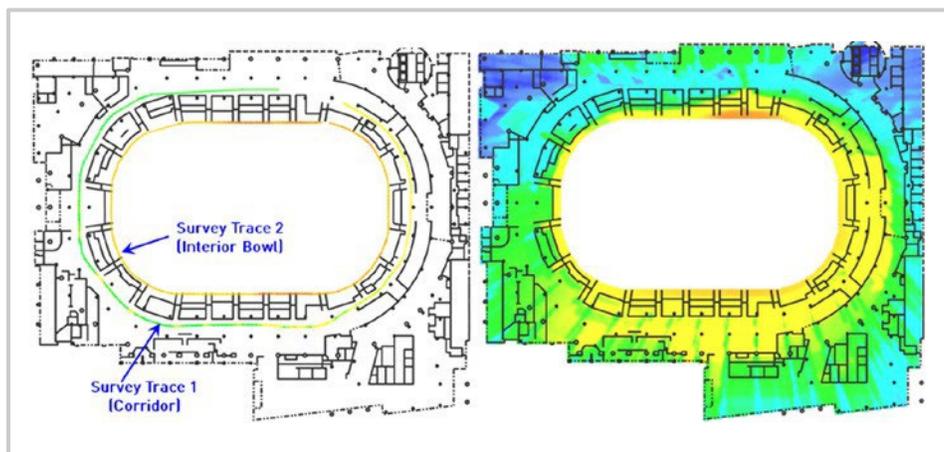
**Figure 45 :**  
Prévision de couverture FRT par défaut et traces de sondage pour l'antenne 1 au niveau 2B.

Les mesures CW et la prédiction de couverture FRT par défaut sur le niveau 2, provenant d'une antenne située à au même niveau, sont présentées dans la figure 46.



**Figure 46 :**  
Prévision de couverture FRT par défaut et traces de sondage CW pour l'antenne 2 au niveau 2.

Les mesures CW et la carte de couverture FRT par défaut du niveau 2B, dérivée de l'antenne 3 située au niveau 7, sont illustrées à la figure 47.



**Figure 47 :**  
Prédiction FRT et traces de sondage pour le niveau 2B avec l'antenne 3 au niveau 7

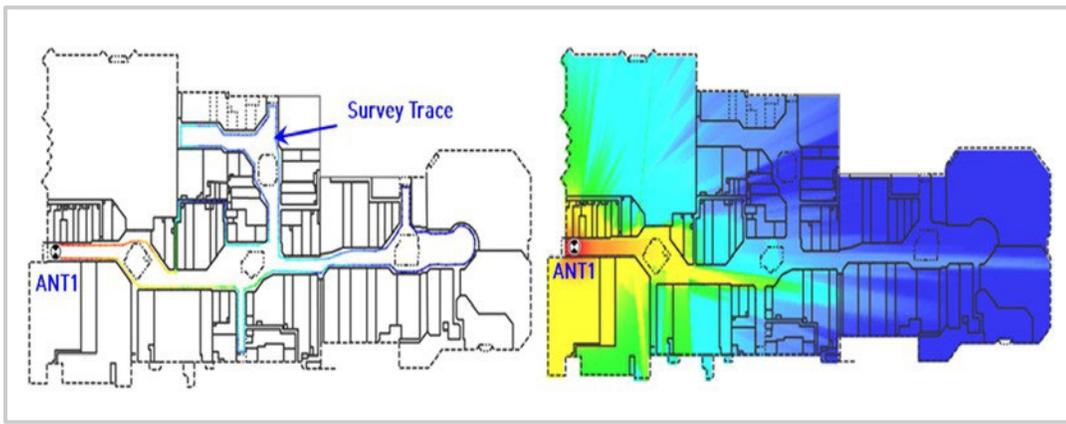
Le tableau suivant résume la précision de la prédiction à l'arène (2100 MHz) :

|           |                         | ERREUR MOYENNE | ABS ERREUR MOYENNE | STD DEV |
|-----------|-------------------------|----------------|--------------------|---------|
| Antenne 1 | Bol intérieur           | -2.7           | 4.65               | 4.88    |
|           | Corridor                | -0.63          | 4.66               | 5.54    |
| Antenne 2 | Les coulisses           | 3.07           | 4.95               | 5.53    |
|           | Retour en coulisses     | 1.66           | 4.57               | 5.42    |
|           | Vestiaire des visiteurs | -0.95          | 4.28               | 5.15    |
|           | Bol intérieur           | -2.28          | 4.19               | 4.98    |
| Antenne 3 | Bol intérieur           | 1.8            | 4.3                | 5.47    |
|           | Corridor                | 0.55           | 5.64               | 6.7     |

**Tableau 14 :**  
Résultats pour NHL Arena.

## Centre Rockland

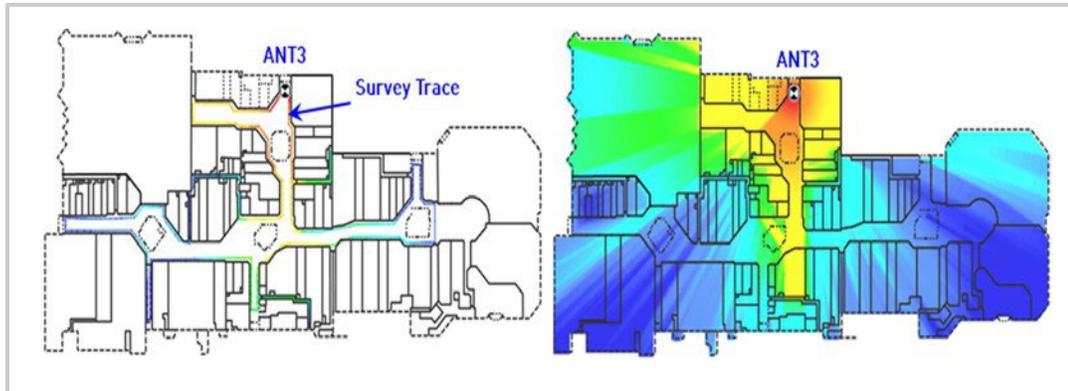
Dans les figures suivantes, nous présentons les mesures CW et la prédiction de couverture FRT par défaut à Rockland Center. La figure 48 présente les résultats des traces de prédiction et d'étude pour l'antenne 1 au niveau 2.



**Figure 48 :**

Prédiction par défaut et tracé de l'enquête pour l'antenne 1 au niveau 2.

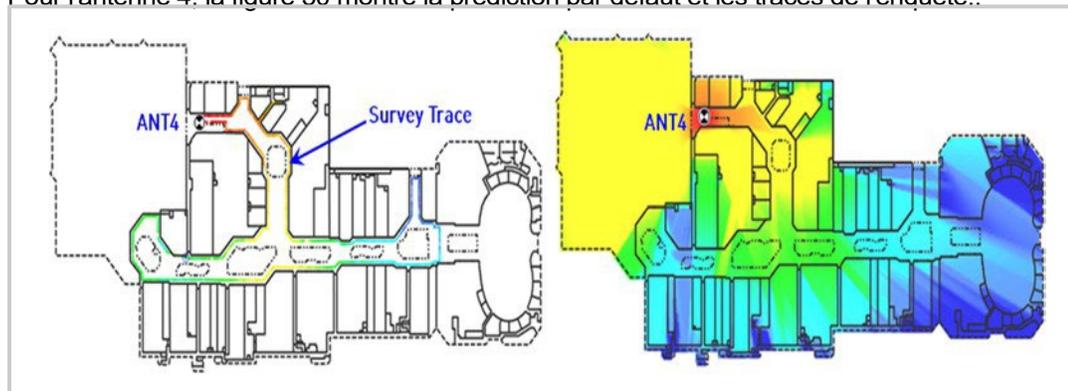
Les résultats de la prédiction FRT par défaut et des traces de sondage CW pour l'antenne 3 au niveau 2 sont présentés à la figure 49.



**Figure 49 :**

Prédiction FRT par défaut et traces d'enquête pour l'antenne 3 au niveau 1.

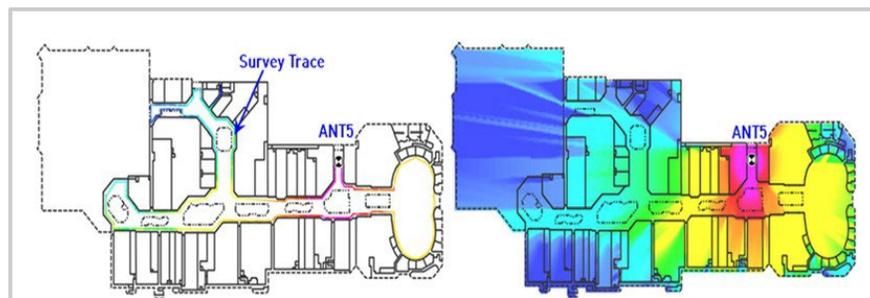
Pour l'antenne 4, la figure 50 montre la prédiction par défaut et les traces de l'enquête..



**Figure 50 :**

Prédiction FRT par défaut et tracés d'enquête CW pour l'antenne 4 au niveau 1.

Enfin, la prédiction par défaut et les traces d'enquête au niveau 3 pour l'antenne 5 sont présentées à la figure 51 au niveau 3.



**Figure 51 :**

Prédiction FRT par défaut et traces de sondage CW pour l'antenne 5, au niveau 3.

Le tableau suivant résume la précision de la prédiction au centre commercial (2100 MHz)

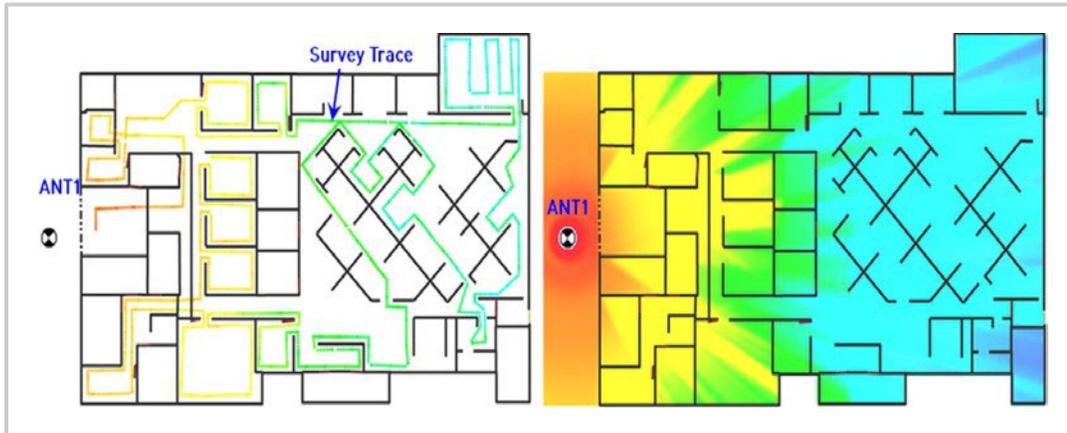
**Tableau 15 :**  
Résultats pour Shopping mall.

---

|           |          | ERREUR<br>MOYENNE | ABS<br>ERREUR<br>MOYENNE | STD DEV |
|-----------|----------|-------------------|--------------------------|---------|
| Antenne 1 | Niveau 2 | 1.62              | 4.79                     | 5.55    |
| Antenne 3 | Niveau 2 | 1.49              | 4.77                     | 5.56    |
| Antenne 4 | Niveau 3 | 3.55              | 5.62                     | 5.63    |
| Antenne 5 | Niveau 3 | 7.37              | 7.95                     | 5.36    |

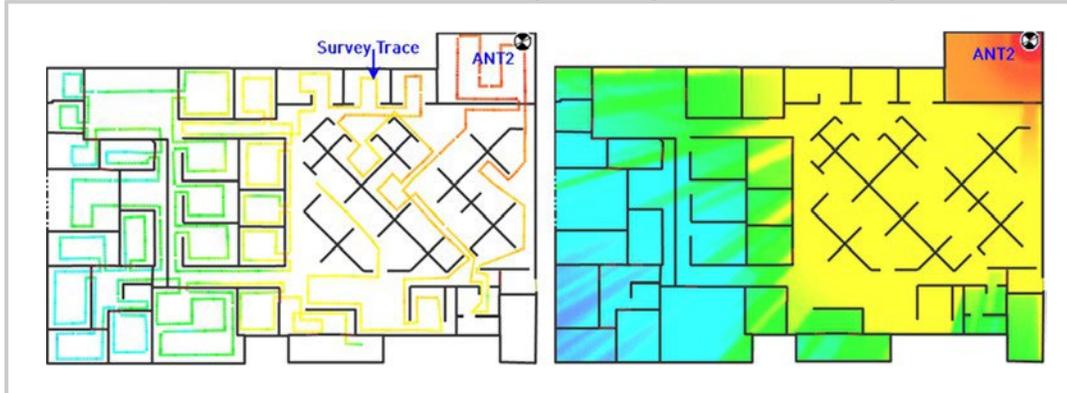
## Bureau du siège d'iBwave

Dans les figures suivantes, nous présentons les mesures de CW et la prédiction de couverture par défaut chez iBwave HQ. La figure 52 présente les mesures CW et les prévisions de couverture pour l'antenne 1.



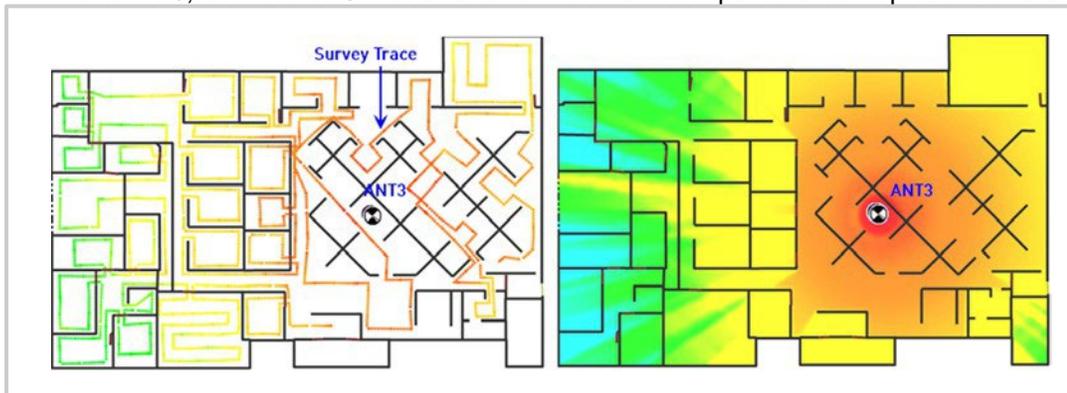
**Figure 52 :**  
Couverture FRT par défaut  
et trace de sondage CW  
pour l'antenne 1.

Les mesures CW et la carte de couverture FRT par défaut pour l'antenne 2 sont présentées à la figure 53.



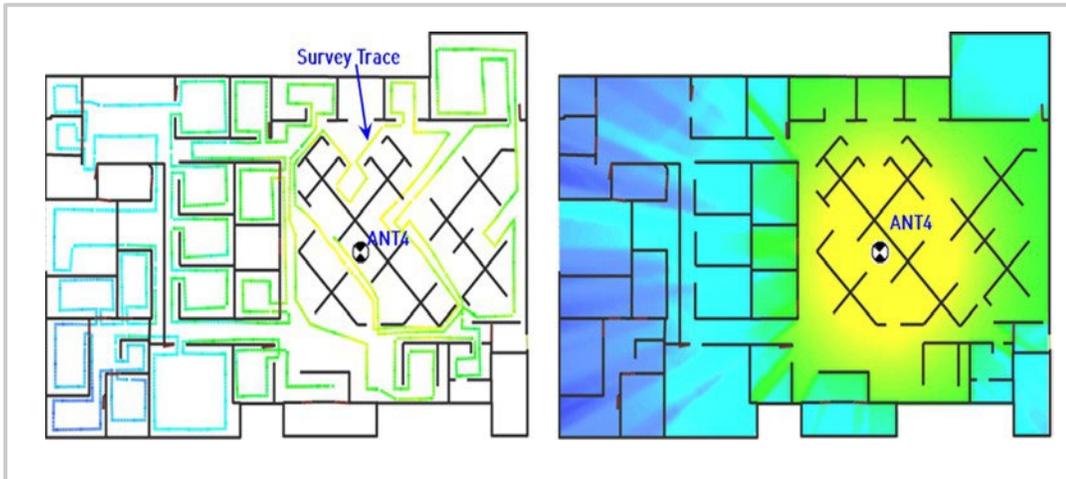
**Figure 53 :**  
Couverture FRT par défaut  
et trace de sondage CW  
pour l'antenne 2.

Pour l'antenne 3, les mesures CW et la carte de couverture FRT par défaut sont présentées à la figure 54.



**Figure 54 :**  
Couverture FRT par défaut  
et trace de sondage CW  
pour l'antenne 3

Enfin, les mesures CW et la carte de couverture FRT par défaut pour l'antenne 4 sont présentées à la figure 55.



**Figure 55 :**  
Couverture FRT par défaut  
et trace de sondage CW  
pour l'antenne 4.

Le tableau suivant résume la précision de la prédiction au bureau (2100 MHz) :

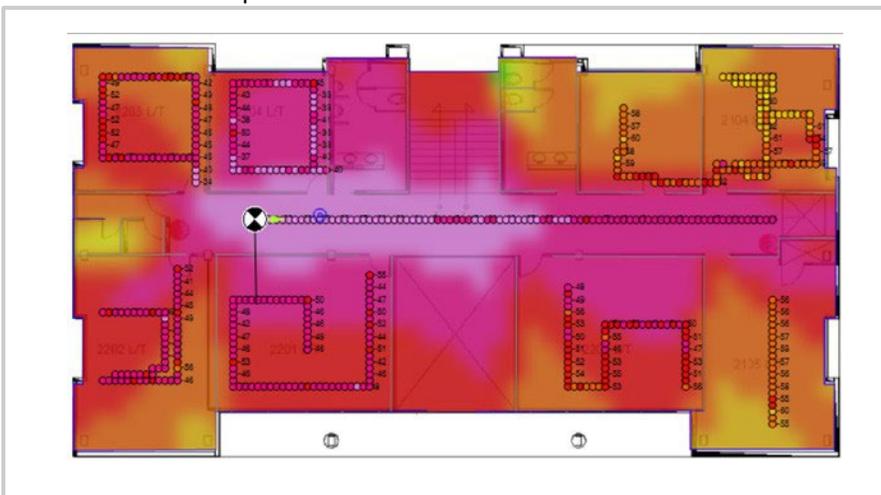
|           | ERREUR MOYENNE | ABS ERREUR MOYENNE | STD DEV |
|-----------|----------------|--------------------|---------|
| Antenne 1 | 6.61           | 6.67               | 3.2     |
| Antenne 3 | 4.75           | 5.08               | 3.4     |
| Antenne 4 | 4.3            | 4.82               | 3.93    |
| Antenne 5 | 4.55           | 5.28               | 4.72    |

**Tableau 16 :**  
Prédiction par rapport aux données  
mesurées : L'ancien QG d'iBwave.

## 2400 MHz

### Bâtiment 2

Au deuxième niveau du bâtiment 2, une étude de couverture en ondes entretenues à 2 400 MHz a été réalisée à l'aide d'une antenne directionnelle placée à l'extrémité d'un long couloir reliant plusieurs laboratoires. La figure 56 présente la prédiction de couverture FRT par défaut superposée à l'étude CW, avec une moyenne d'évanouissement rapide.



**Figure 56 :**  
Couverture CW prévue et mesurée à 2400 MHz  
dans le bâtiment 2, niveau 2.

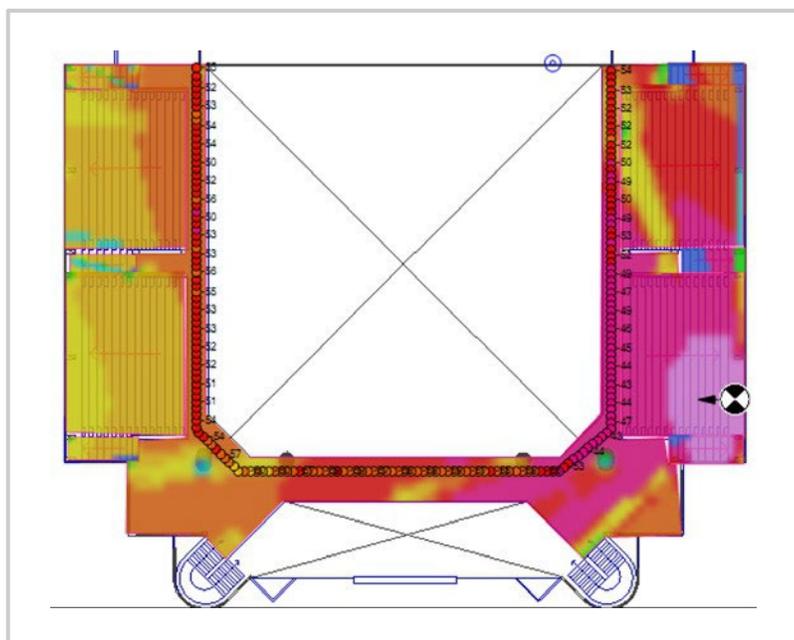
Le tableau suivant résume la précision de la prédiction :

| Résumé de la prédiction par rapport aux données mesurées Valeur (dB) |      |
|--|------|
| Erreur moyenne ( $\mu$ )   | 2.23 |
| Erreur moyenne absolue ( $\mu$ )                                     | 4.77 |
| Écart-type ( $\sigma$ )  | 5.64 |

**Tableau 17 :**  
Données prédites par rapport aux données mesurées : Bâtiment 2, niveau 2, 2400 MHz

## Bâtiment 9

Au troisième niveau du bâtiment 9, une étude de couverture CW à 2400 MHz a été réalisée au bas de la zone des sièges des spectateurs. Une antenne directionnelle a été placée au-dessus de la dernière rangée de sièges et pointait vers le bas à un angle de 45 degrés. La figure suivante montre la prédiction de couverture FRT par défaut superposée à l'étude CW, avec l'évanouissement rapide supprimé.



**Figure 57 :**  
Couverture CW prévue et mesurée à 2400 MHz dans le bâtiment 9, niveau 3.

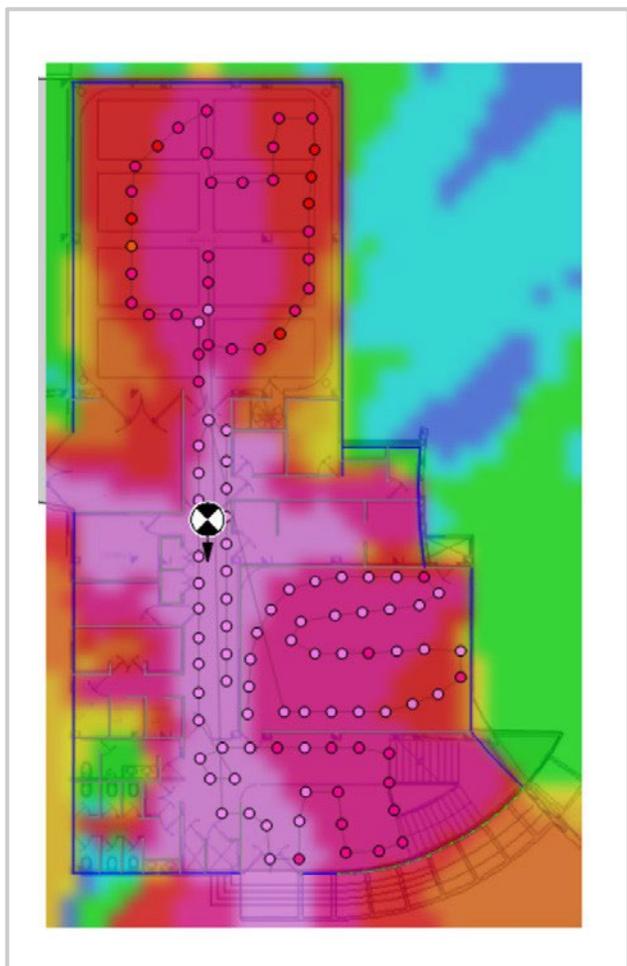
Le tableau suivant résume la précision de la prédiction :

| Résumé de la prédiction par rapport aux données mesurées Valeur (dB) |      |
|--|------|
| Erreur moyenne ( $\mu$ )   | 0.73 |
| Erreur moyenne absolue ( $\mu$ )                                     | 4.00 |
| Écart-type ( $\sigma$ )  | 4.88 |

**Tableau 18 :**  
Données prédites par rapport aux données mesurées : Bâtiment 9, niveau 3, 2400 MHz.

## Bâtiment 10

Au deuxième niveau du bâtiment 10, une étude de couverture en ondes entretenues à 2 400 MHz a été réalisée à l'aide d'une antenne directionnelle située au centre. La figure 58 illustre la prédiction de couverture FRT par défaut superposée à l'étude en ondes entretenues, la moyenne des évanouissements rapides étant éliminée..



**Figure 58 :**  
Couverture CW prévue et mesurée à 2400 MHz dans le bâtiment 10, niveau 2.

Le tableau suivant résume la précision de la prédiction :

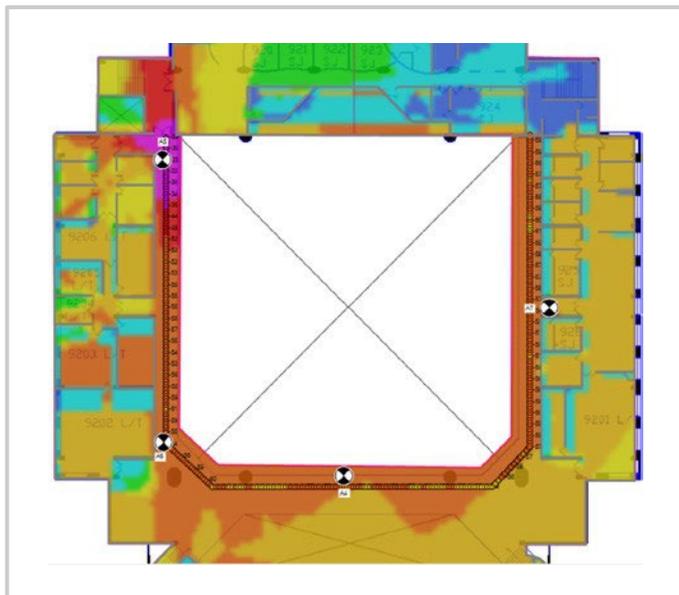
| Résumé de la prédiction par rapport aux données mesurées Valeur (dB) |      |
|--|------|
| Erreur moyenne ( $\mu$ )   | 4.40 |
| Erreur moyenne absolue ( $\mu$ )                                     | 5.31 |
| Écart-type ( $\sigma$ )  | 5.05 |

**Tableau 19 :**  
Données prédites par rapport aux données mesurées : Bâtiment 10, niveau 2, 2400 MHz.

## 3200 MHz

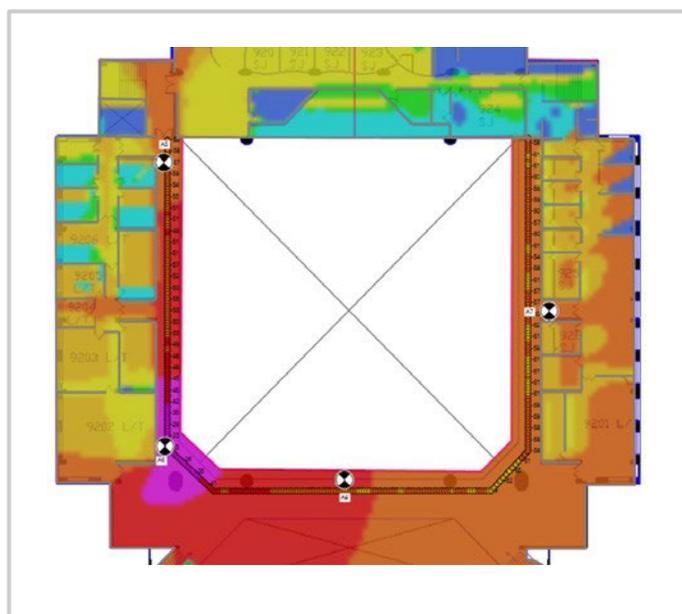
### Bâtiment 9

Au deuxième niveau du bâtiment 9, des études de couverture en ondes entretenues ont été réalisées à 3200 MHz à l'aide d'antennes omnidirectionnelles. La figure 59 illustre la prédiction de couverture FRT par défaut superposée à l'étude en ondes entretenues pour l'antenne 5, avec une moyenne d'évanouissement rapide.



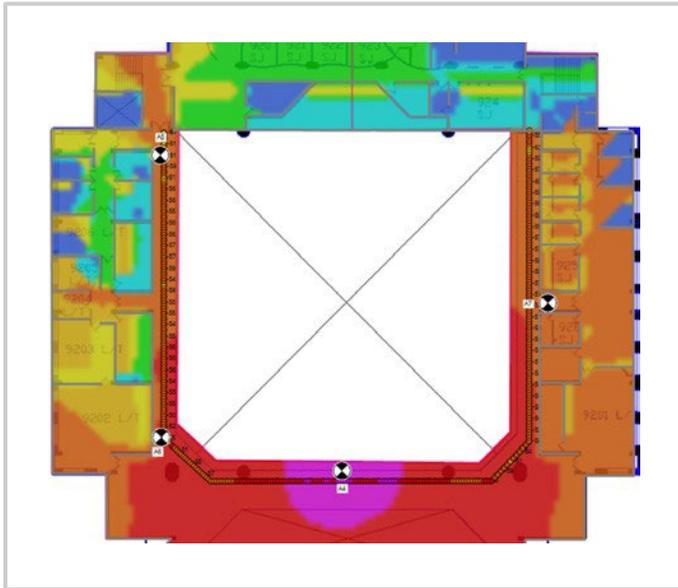
**Figure 59 :**  
Couverture CW prévue et mesurée, antenne 5.

La figure 60 illustre la prédiction de couverture FRT par défaut superposée à l'étude CW pour l'antenne 6, avec une moyenne des évanouissements rapides.



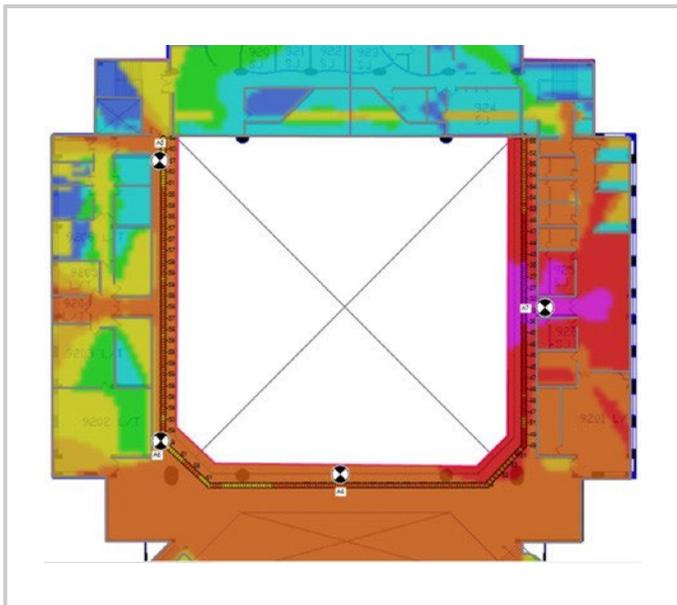
**Figure 60 :**  
Couverture CW prévue et mesurée,  
Antenne 6.

La figure 61 illustre la prédiction de couverture FRT par défaut superposée à l'étude CW pour l'antenne 4, avec une moyenne des évanouissements rapides.



**Figure 61 :**  
Couverture CW prévue et mesurée, antenne 4.

La figure 62 illustre la prédiction de couverture FRT par défaut superposée à l'étude CW pour Antenne 7, avec moyenne des évanouissements rapides.



**Figure 62 :**  
Couverture CW prévue et mesurée, antenne 7.

Les statistiques d'erreur pour les quatre antennes sont résumées dans le tableau ci-dessous :

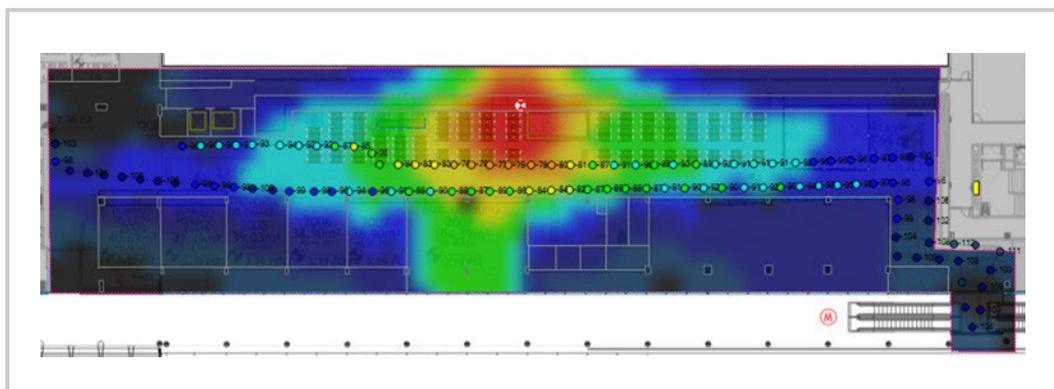
|           | ERREUR MOYENNE | ABS ERREUR MOYENNE | STD DEV |
|-----------|----------------|--------------------|---------|
| Antenne 5 | -3.8           | 4.37               | 3.30    |
| Antenne 6 | -4.8           | 5.45               | 3.84    |
| Antenne 4 | -5.54          | 5.54               | 2.36    |
| Antenne 7 | -3.54          | 4.13               | 3.24    |

**Tableau 20 :**  
Prédiction par rapport aux données mesurées :  
Bâtiment 9, 3200 MHz

## 3500 MHz

### Centre commercial Bossa Nova

Contrairement aux sites précédents, l'enquête au Bossa Nova Mall a été menée en utilisant un réseau 5G NR à cette fréquence. L'antenne de l'enquête était située près du centre de l'aire de restauration, au niveau de la mezzanine à Rio de Janeiro. La figure 63 montre la prédiction de couverture FRT 5G NR SS-RSRP superposée à l'étude 5G NR, l'évanouissement rapide étant supprimé par le calcul de la moyenne du signal sur 20 longueurs d'onde.



**Figure 63 :**  
Couverture 5G NR prédite et mesurée à Bossa Nova Mall.

Le tableau suivant résume la précision de la prédiction :

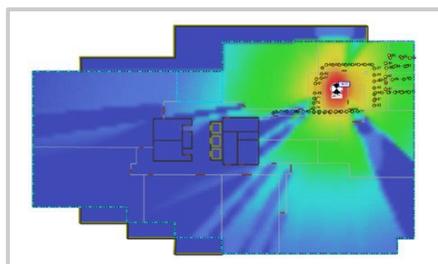
| Résumé de la prédiction par rapport aux données mesurées Valeur (dB) |      |
|--|------|
| Erreur moyenne ( $\mu$ )   | 1.46 |
| Erreur moyenne absolue ( $\mu$ )                                     | 4.04 |
| Écart-type ( $\sigma$ )  | 5.36 |

**Tableau 21 :**  
Prédiction par rapport aux données mesurées : L'aire de restauration du centre commercial Bossa Nova Mall.

## 28 GHz

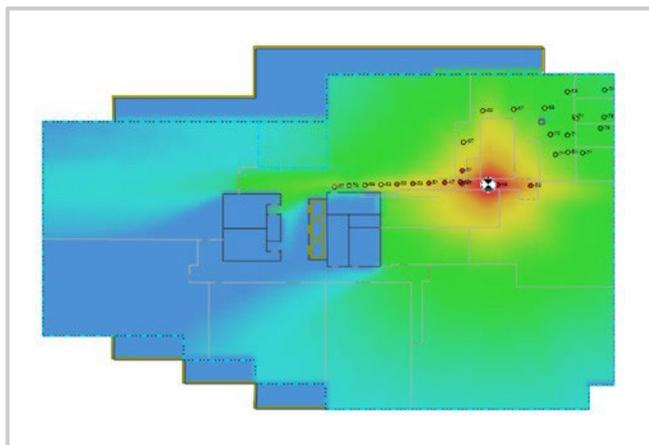
### Bureau Consultix

Dans les figures suivantes, nous présentons la prédiction de couverture FRT par défaut et l'étude CW au bureau de Consultix. Il y a quatre emplacements d'antennes pour cette étude, et pour l'antenne 1, l'étude et la prédiction de couverture sont montrées avec une moyenne d'évanouissement rapide.



**Figure 64 :**  
Couverture prédite et mesurée en ondes entretenues pour l'antenne 1.

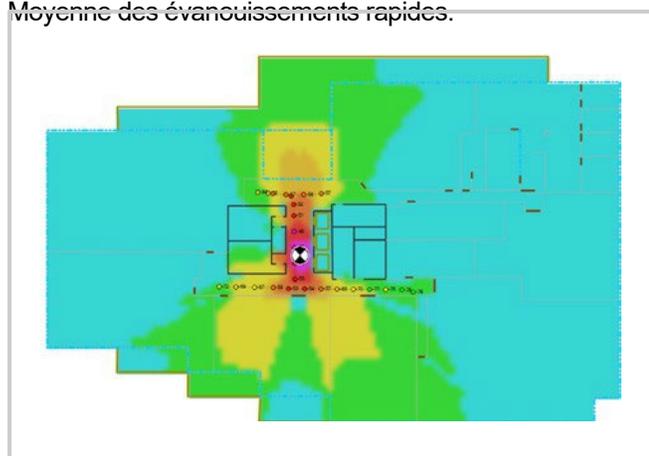
Pour l'antenne 2, l'étude et la prévision de la couverture sont présentées avec une moyenne d'évanouissement rapide.



**Figure 65 :**  
Couverture CW prévue et mesurée pour l'antenne 2.

---

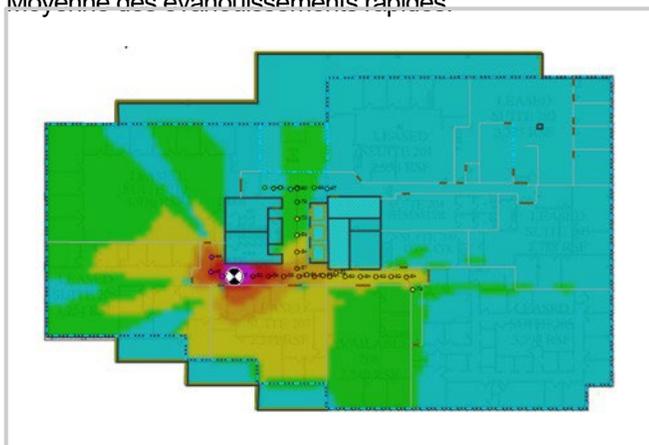
Pour l'antenne 3, l'étude et la prévision de couverture sont présentées dans la figure suivante avec Moyenne des évanouissements rapides.



**Figure 66 :**  
Couverture CW prévue et mesurée pour l'antenne 3.

---

Pour l'antenne 4, l'étude et la prévision de couverture sont présentées dans la figure suivante avec Moyenne des évanouissements rapides.



**Figure 67 :**  
Couverture CW prévue et mesurée pour l'antenne 4.

---

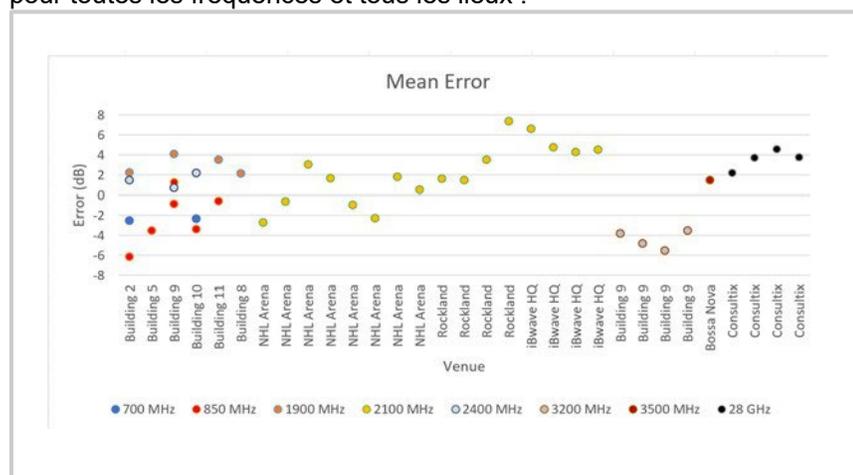
Le tableau suivant résume la précision de la prédiction :

|           | ERREUR MOYENNE | ABS ERREUR MOYENNE | STD DEV |
|-----------|----------------|--------------------|---------|
| Antenne 1 | 2.18           | 4.90               | 5.68    |
| Antenne 2 | 3.74           | 4.33               | 4.28    |
| Antenne 3 | 4.59           | 4.91               | 4.17    |
| Antenne 4 | 3.78           | 4.53               | 3.90    |

**Tableau 22 :**  
Comparaison entre les données prédites et les données mesurées à Bureau Consultix à 28 GHz.

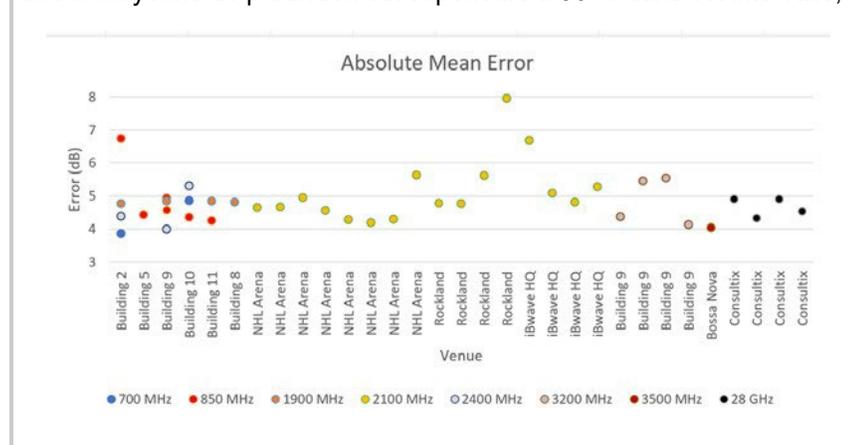
## Analyse des données

Un aperçu de la précision de la prédiction par défaut est présenté ci-dessous. La différence entre la prédiction et la mesure est l'erreur de prédiction, et les statistiques d'erreur sont présentées dans les trois figures suivantes pour toutes les fréquences et tous les lieux :



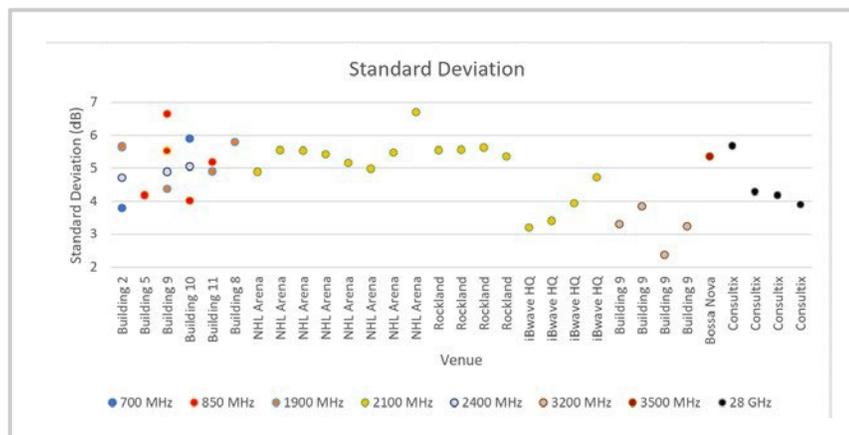
**Figure 68 :**  
Erreur de prédiction erreur moyenne pour toutes les enquêtes.

La plupart (37 sur 40) des valeurs d'erreur moyenne se situent entre -4 et 5 dB. Cela signifie que la probabilité que l'erreur moyenne de prédiction est supérieure à 90 % dans cet intervalle, quelle que soit la fréquence.



**Figure 69 :**  
Erreur de prédiction erreur moyenne absolue pour toutes les enquêtes.

La plupart (37 sur 40) des valeurs d'erreur moyenne absolue se situent entre 4 et 6 dB. Cela implique que la probabilité que l'erreur moyenne absolue de la prédiction se situe dans cette fourchette est supérieure à 90 %, quelle que soit la fréquence.



**Figure 70 :** Écart-type de l'erreur de prédiction pour toutes les enquêtes.

La plupart (37 sur 40) des valeurs d'écart-type se situent dans la plage de 3 à 6 dB. Cela signifie que la probabilité que l'écart-type de la prédiction se situe dans cette plage est supérieure à 90 %, quelle que soit la fréquence.

Les données présentées dans ce chapitre suggèrent que l'algorithme de prédiction FRT par défaut (non calibré) a une précision constante pour toutes les fréquences et tous les lieux, de 700 MHz à 28 GHz. La probabilité que l'erreur moyenne absolue et l'écart type soient inférieurs à 6 dB est supérieure à 90%, quelle que soit la fréquence.

# Conclusion

Nous avons présenté les résultats des campagnes d'étude menées dans 11 sites sur 8 bandes de fréquences. Des études CW à 700, 850, 1900, 2400 et 3200 MHz ont été menées dans 6 bâtiments du campus Tecnológico de Monterrey à Querétaro, au Mexique. Une étude CW à 2100 MHz a été réalisée dans le cadre de la campagne d'étude CW.

Une étude 5G NR a été menée à 3500 MHz au centre commercial Bossa Nova à Rio de Janeiro, au Brésil, et une étude CW à 28 GHz a été menée dans les bureaux de Consultix à New Cairo, en Égypte.

Les résultats sont résumés dans les figures 68 et 70. Ces figures représentent 40 mesures. Seize ont été prises à 2100 MHz, six à 850 MHz, quatre à 28 GHz, 3200 MHz et 1900 MHz, trois à 2400 MHz, deux à 700 MHz et une à 3500 MHz.

Dans la plupart des enquêtes, l'antenne d'émission a été placée au même niveau que les données mesurées. Cependant, il y a eu quelques exceptions à cette règle.

Le stade NHL et le centre commercial Rockland Center, où l'antenne d'émission et les données mesurées étaient situées à des niveaux différents. Comme ces lieux sont principalement des lieux à visibilité directe, nous n'avons pas observé d'augmentation significative de l'erreur dans la couverture prédite par rapport à la couverture mesurée, par rapport aux cas où les antennes d'émission et de réception étaient situées au même niveau.

En ce qui concerne la précision du FRT, l'erreur moyenne de prédiction se situe principalement entre -4 et 5 dB, tandis que l'erreur moyenne absolue se situe principalement entre 4 et 6 dB. En outre, l'écart type se situe principalement entre 3 et 6 dB. Ces valeurs représentent le FRT par défaut, non calibré.

et s'appliquent à toutes les fréquences comprises entre 700 MHz et 28 GHz. On s'attend à ce que l'étalonnage améliore la précision de 0.5 à 2 dB. Cependant, la précision exacte de la prédiction FRT étalonnée dépasse le cadre du présent document.

## À propos d'iBwave

Les solutions iBwave, la norme en matière de planification de réseaux intérieurs convergents, sont à l'origine d'une expérience sans fil exceptionnelle dans les bâtiments, permettant à des milliards d'utilisateurs finaux et d'appareils de se connecter dans un large éventail de lieux. En tant que référence mondiale de l'industrie, nos solutions logicielles permettent une planification, une conception et un déploiement plus intelligents de tout projet, quelles qu'en soient la taille, la complexité ou la technologie. Outre des logiciels innovants, nous sommes reconnus pour notre assistance de classe mondiale dans 100 pays, pour notre base de données de composants la plus complète de l'industrie et pour notre programme de certification bien établi. Pour plus d'informations, visitez : [www.ibwave.com](http://www.ibwave.com)



[www.ibwave.com](http://www.ibwave.com)