

Table des matières

2016

Liste des abbreviations	6
Résumé	7
Abstract.....	8
Introduction générale	9
Chapitre un	11
1. Contexte de l'étude	12
2 - PROBLEMATIQUE.....	13
3 - Objectifs de notre système	13
4. Résultats attendus.....	14
5. Généralités sur les télécommunications par satellite.....	14
5.1. Origine des télécommunications par satellite	15
5.2. Présentation du satellite	16
5.3. Architecture d'un système de télécommunications par satellite	17
5.3.1. Le secteur spatial	17
5.3.2. Le secteur terrien	17
5.4. Orbites satellitaires	19
5.5. Bandes de fréquences et techniques d'accès.....	20
5.5.1. Bandes de fréquences	20
5.5.2. Techniques d'accès.....	22
6. Généralités sur les bilans de liaison	25
6.1. Principe du bilan de liaison	25
6.2. Les causes de dégradation du signal	27
6.2.1. Les pertes de propagation.....	28
6.2.2. Les pertes locales.....	32
6.2.3. Les autres facteurs influençant le signal	32
6.3. Etablissement d'un bilan de liaison	33
7. La bande Ka	35
7.1. Les systèmes satellitaires et la bande Ka	35
7.2. Classifications des atténuations en bande Ka	36
7.2.1. Atténuation due aux nuages.....	37
7.2.2. Atténuation due aux précipitations	37
7.2.3. Atténuation due aux gaz	38
8. ETAT DE L'ART	39
8.1. Couverture nuageuse et fréquence des précipitations	39

8.2.	Caractéristiques du spectre pour les accès hertziens.....	41
8.3.	Quelques systèmes de calcul du bilan de liaison satellite.....	42
8.3.1.	Le système « SATELLITE LINK BUDGET CALCULATOR ».....	42
8.3.2.	Le système « Satcoms UK- calculateur de bilan de liaisons.....	43
Chapitre deux.....		46
1.	METHODOLOGIE GENERALE.....	47
1.1.	Diagramme de la méthode.....	47
1.2.	Présentation générale du système.....	47
1.2.1.	Besoins fonctionnels.....	48
1.2.2.	Besoins non fonctionnels.....	48
1.3.	Architecture Conceptuelle et modélisation du système.....	48
1.3.1.	Architecture client/serveur.....	51
1.3.2.	Définition des classes d'entités.....	52
1.3.3.	Modèle conceptuel de données.....	53
1.4.	Architecture fonctionnelle du système.....	55
1.5.	Définition des outils et paramètres d'implémentation.....	56
1.5.1.	Choix des outils d'implémentation.....	56
1.5.2.	Paramètres d'implémentation du calculateur.....	61
	<input type="checkbox"/> Coordonnées géographiques de la station :.....	63
	<input type="checkbox"/> Caractéristiques de l'antenne d'émission :.....	65
	<input type="checkbox"/> Pertes :.....	67
	<input type="checkbox"/> Coordonnées du satellite :.....	68
	<input type="checkbox"/> Bande passante satellitaire :.....	69
Chapitre trois.....		73
1.	RESULTATS DE L'IMPLEMENTATION.....	74
1.1.	Architecture structurelle de l'application.....	74
1.2.	Page de Login.....	75
1.3.	Page d'accueil.....	76
1.4.	Liaison montante (Station émettrice).....	77
1.5.	Paramètres satellitaires.....	79
1.6.	Liaison descendante (Station réceptrice).....	80
1.7.	Exemple de rapport PDF généré.....	81
9.	Exemple de calcul d'un bilan de liaison en bande C, Ku et en bande Ka.....	82
2.	Evaluation des résultats obtenus.....	83
2.2.	Méthodes de compensation.....	84
2.2.1.	Le contrôle de puissance.....	85
2.2.2.	Techniques de diversité.....	85
Conclusion générale.....		87

Bibliographie	89
2 ANNEXE A : LE STANDARD DVB-S2	91

2016

3

Table des illustrations

2016

Figure 1 : Composantes d'un système de télécommunications par satellite [4]	18
Figure 2 : Schéma d'un multiplexage en fréquence FDMA[6].....	23
Figure 3 : Schéma d'u multiplexage temporel TDMA [6].....	24
Figure 4 : Atténuation du signal en fonction de la distance – trait continu : en espace libre et trait interrompu en présence d'une réflexion [10]	31
Figure 5 : Synoptique d'une liaison via satellite [12]	34
Figure 6 : Trajet d'un signal affecté par les facteurs atmosphériques.....	37
Figure 7 : Atténuation due à la pluie en Ku, Ka et V[14]	38
Figure 8 : fréquence des précipitations en zone tropicale africaine [15]	40
Figure 9 : pourcentage de couverture des nuages de basse altitude en zone tropicale africaine [15].....	40
Figure 10 : les principales zones climatiques Africaines [15].....	41
Figure 11 : aperçu de l'interface utilisateur de l'outil de calcul « Satellite link budget calculator ».....	43
Figure 12 : Interface graphique calculateur « Satcom UK – calculateur de bilan de liaison » - utilisateurs non évolués.....	44
Figure 13 : interface d'interaction avec l'utilisateur du « Satcom UK -Calculateur de bilan de liaison »- utilisateurs évolués	45
Figure 14 : Diagramme de la méthode de conception du calculateur	47
Figure 15 : Interaction entre le Modèle, la Vue et le Contrôleur [16].....	50
Figure 16 : Processus de traitement d'une demande client [16]	51
Figure 17 : Schéma de l'architecture client/serveur 2-tier	51
Figure 18 : Modèle conceptuel de données du calculateur	54
Figure 19 : Comparaison des frameworks PHP [17]	59
Figure 20 : Procédure de calcul d'un bilan de liaison.....	62
Figure 21 : Représentation de la latitude et la longitude [18]	64
Figure 22 : page de Login.....	75
Figure 23 : Page d'accueil du calculateur	76
Figure 24 : Page de calcul liaison montante	77
Figure 25 : Formulaire de calcul d'un paramètre.....	78
Figure 26 : Page de calcul paramètres satellitaires	79
Figure 27 : Page de calcul liaison descendante (Downlink)	80

Liste des tableaux

2016

Tableau 1 : Couverture satellitaire du Cameroun	19
Tableau 2 : Nomenclature des bandes de fréquences [5].....	21
Tableau 3 : Bandes de fréquences et services	21
Tableau 4 : Classification des atténuations en transmissions [7].....	28
Tableau 5 : Classification des pertes atmosphériques en fonction de la fréquence [9].....	30
Tableau 9 : Quelques systèmes satellitaires exploitant la bande Ka[13]	36
Tableau 6 : Tableau comparatif langages de programmation Java et PHP	56
Tableau 7 : Tableau comparatif des frameworks Java et PHP	58
Tableau 8 : Outils d'implémentation du calculateur	60

Liste des 2016 abbreviations

CDMA : Code Division Multiple Access
CRTV : Cameroon Radio Television
DS-SS: Direct sequence spread spectrum
DVB-S : Digital Video Broadcasting Standard
FAMA: Fixed Assignment Multiple Access
FDMA : Frequency Division Multiple Access
FEC: Forward Error Correction
FH: Faisceau Hertzien
FO: Fibre optique
GEO : Geostationary Orbit
ITU: International Telecommunication Union
LEO: Low Earth Orbit
MEO: Medium Earth Orbit
PIRE: Puissance Isotrope rayonnée Equivalente
P-P: Point à Point
P-MP: Point à Multipoint
Qos: Quality of service
QPSK: Quadrature Phase Shift Keying
TDMA: Time Division Multiple Access
VSAT: Very Small Aperture Terminal

Résumé

2016

Dans le cadre de notre stage ingénieur à la CRTV (Cameroon Radio Television), nous nous sommes intéressés aux liaisons satellitaires et plus précisément aux bilans de liaison. Nous avons axé notre travail sur deux aspects principaux à savoir : la conception et la réalisation d'un calculateur de bilan de liaison d'une part et l'évaluation, au moyen de résultats obtenus dans l'axe précédent, des performances de la bande Ka, une des trois principales bandes de fréquences étudiées dans ce travail, d'autre part. ce travail vise à fournir, aux exploitants du service des liaisons satellitaires, un outil fiable, leur permettant de vérifier la qualité des liaisons satellitaires, afin de faire des choix s'imposant sur les méthodes à exploiter pour compenser, si nécessaire, les pertes de puissance du signal venant du satellite et/ou en direction du satellite. Ceci dans l'optique de rendre aux divers utilisateurs des services de radiodiffusion par satellite, une meilleure qualité du signal satellitaire reçu dans leurs domiciles et par ce biais, la satisfaction visuelle et auditive pour lesquelles ils reversent des redevances audio visuelles au quotidien. Nous avons donc pour ce faire, mis sur pieds un calculateur de bilan de liaison satellitaire permettant aux exploitants du service des liaisons satellitaires d'effectuer des calculs sur les liaisons. Les résultats ainsi obtenus sur les liaisons pourront ensuite être sauvegardés pour suivre au fil du temps l'évolution de chaque liaison (montante ou descendante) et effectuer des comparaisons pour mieux détecter d'éventuelles pertes de puissance sur le signal.

Mots clés : liaisons satellitaires, bande Ka, bilan, fréquences, signal.

Abstract

2016

As part of our engineering internship at CRTV (Cameroon Radio Television), the aim of our work concerning satellite links, precisely link budgets, was focused on two principal aspects, the conception and realization of a satellite link budget calculator, and an evaluation, from the results obtained by this latter, of the performances of the Ka band, one of the three principal frequency bands studied in this work. It comes to us, to provide to the users of the satellite links service, a reliable tool, enabling them to verify the satellite links quality, and then make the right choices concerning the compensation methods to compensate for, if necessary, the power loss of the signal, coming from and/or going to the satellite. This in perspective of making the users of the satellite broadcasting services, to recover a better quality of the satellite signal received and thus, the visual and auditory satisfaction for which they are giving daily broadcasting royalties. So we have to do this, we have made a satellite link budget calculator to allow the users of the satellite link service to perform calculations on links. The results obtained on links can then be saved to monitor every link (uplink or downlink), to eventually detect the signal losses.

Key words: satellite links, Ka band, budget, frequencies, signal.

Introduction générale

2016

L'accroissement exponentiel des volumes de communications, avec notamment l'avènement de la 3G, de la 4G et de la TNT, font recours à des services qui nécessitent davantage de la disponibilité d'une large partie du spectre radioélectrique et même, pour certaines applications, le transport à des débits très élevés de volumes importants d'informations. La nécessité d'accroître les débits de transmission des informations s'accompagne par celle de disposer d'une bande passante conséquente. Cette ressource n'étant pas infinie, les opérateurs satellitaires, dans le domaine des télécommunications par satellite, explorent de plus en plus des bandes de fréquences non encore exploitées ou sous exploitées. Les bandes C et Ku ont permis le développement et le déploiement de plusieurs nouveaux services et l'extension des possibilités de communications, en offrant de bonnes performances en terme de services et de qualité de service, et en réduisant les coûts engendrés par le déploiement et l'acquisition des équipements de communication.

Toutefois, ces bandes de fréquences ne permettent que l'utilisation d'une partie assez réduite du spectre fréquentiel, de l'ordre de 300MHz environ, et la disponibilité des fréquences dans les bandes les plus utilisées actuellement (bandes C et Ku), pour les services de télécommunication se fait de plus en plus criarde [1] Ceci est dû à l'augmentation des opérateurs satellitaires, des chaînes de télévision, engendrant également une augmentation nombre de satellites actuellement en orbites autour de la Terre. La nécessité de l'utilisation de fréquences plus élevées, offrant des spectres de fréquences plus large et permettant de gagner en termes de fréquences disponibles, devient donc une question d'actualité.

Or, dans le domaine fréquentiel, l'exploitation de la bande de fréquence Ka, jusqu'ici exploitée dans les pays d'Europe principalement et inexploitée dans les zones tropicales notamment en Afrique, nous donne la possibilité de disposer d'un spectre plus étendu, de 500MHz tant sur le lien montant (de 29.5GHz à 30GHz) que le lien descendant (de 19.7GHz à 20.2GHz). Elle permet également de desservir les utilisateurs de services de radiodiffusion par satellite, en réduisant la taille des équipements utilisés, surtout en réception et partant, les coûts d'acquisition et de déploiement du matériel [2].

Aussi, la qualité de liaison satellitaire qui détermine la qualité du service offert aux utilisateurs devient un point de réflexion dans les pays de la zone tropicale, et permet d'émettre des réflexions sur la qualité de service offerte par des liaisons en bande C et en bande Ku, comparativement à celle que pourrait fournir l'établissement d'une liaison en bande Ka. A travers des bilans de liaison satellitaire, il est possible de disposer de résultats concrets sur les liaisons satellitaires, et d'évaluer la qualité de la transmission pour toutes les bandes de fréquences.

Malgré la sensibilité et les contraintes que présente la bande Ka face à l'atténuation atmosphérique, surtout dans les pays situés en zone tropicale, plusieurs systèmes exploitant cette bande existent et sont exploités dans les autres zones du globe. Ce travail vise globalement à explorer la possibilité d'utilisation de la bande Ka au Cameroun et à la CRTV en particulier. Plus spécifiquement, d'une part, il vise à concevoir et réaliser un outil automatique de calcul du bilan de liaison satellitaire en vue de l'évaluation de la qualité de liaison satellitaire ; d'autre part, il vise à étudier les performances offertes par la bande de fréquence Ka pour la radiodiffusion.

La suite de ce document s'organise de la manière suivante : Le premier chapitre présente le contexte général de l'étude, expose la problématique et définit les objectifs visés ; Le deuxième chapitre se focalise sur la conception architecturale et fonctionnelle de l'outil ; Avant la conclusion générale, le troisième chapitre présente les principaux résultats obtenus, avec commentaires et discussions.

2016

Chapitre un

CONTEXTE, PROBLEMATIQUE ET ETAT DE L'ART

Le but de ce chapitre est de nous situer dans le cadre de notre étude, en nous présentant les raisons, mais aussi les tenants et les aboutissants de l'étude, ainsi que les différents concepts y relatifs.

II

1. Contexte de l'étude

A l'heure où le monde est tourné vers le développement et l'expansion rapide et continue des télécommunications, de nombreux acteurs du domaine, notamment les exploitants de toutes les dernières technologies et derniers équipements développés, mettent de plus en plus l'accent sur la qualité de services (Qos), indispensable pour la pérennité des télécommunications. La Qos, est définie par l'union internationale des télécommunications (UIT) comme étant un effet collectif des qualités globales de service qui déterminent le degré de satisfaction d'un utilisateur d'un service, et caractérise cette dernière par des critères tels que : l'opérabilité du service, l'accessibilité du service, la continuité du service, l'intégrité du service pour n'en citer que ceux-là [1]. Le service de télécommunication offert à l'utilisateur est alors traduit par sa qualité de service, qui sera d'autant plus meilleure que les ressources mises en œuvre et le monitoring de celles-ci, ainsi que les modes de transmission exploités par le prestataire de service, seront les plus performants possibles. L'un des moyens les plus simples et nécessaire pour assurer une bonne qualité de service est la mise à la disposition des opérateurs des télécommunications de liaisons fiables et disponibles en permanence, servant à la prestation continue de services auprès des utilisateurs.

Les différentes liaisons employées dans le domaine des télécommunications sont le faisceau hertzien (FH), la fibre optique (FO) et les liaisons satellitaires. Chaque liaison possédant ses caractéristiques propres ainsi que ses avantages et inconvénients, la question de l'indispensabilité d'un type de liaison ou de la primauté d'un type de liaison sur les autres ne saurait se poser, vu leur caractère complémentaire.

Toutefois, en ce qui concerne la couverture mondiale en termes de télécommunications, vu les rayons de couverture étendus et les limites présentées par les liaisons par fibre optique et faisceau hertzien en terme de déploiement et de desserte des utilisateurs, les liaisons satellitaires ont su révéler leur importance et leur nécessité pour la majeure partie des services des télécommunications et touchent aujourd'hui des domaines tels que : la radiodiffusion, la téléphonie, la transmission de données informatiques et de position etc.

Dans le secteur des télécommunications par satellite, plus encore de la radiodiffusion par satellite sur lequel sera axé notre travail, nous nous intéressons aux liaisons satellitaires en bande Ka, plus particulièrement à leur déploiement, leur exploitation, leur viabilité et leurs performances concernant les divers services offerts aux téléspectateurs.

2 - PROBLEMATIQUE

Les opérateurs satellitaires opérant au Cameroun sont nombreux et offrent pour la plupart une couverture complète de la surface du pays.

La CRTV, chaîne de télévision nationale du Cameroun, emploie plusieurs moyens de transmission et de diffusion parmi lesquels les liaisons filaires (à travers les câbles et la fibre optique) et les liaisons sans fil (par faisceau hertzien et par satellite). Le nombre sans cesse croissant d'abonnés et la nécessité de couverture globale du territoire camerounais impose une migration des transmissions vers les liaisons satellitaires. Ce qui impose l'usage des outils de monitoring des liaisons satellitaires pour le suivi de la qualité des liaisons établies.

En termes d'existant, les infrastructures disponibles sont uniquement d'ordre technique, principalement des analyseurs de spectre, et les bandes de fréquences pour la transmission en bande C et en bande Ku. Il naît donc une certaine nécessité de concevoir des outils logiciels pour aider les exploitants du service des télécommunications et les membres de la direction à effectuer un monitoring permanent des liaisons satellitaires. Ce monitoring passera par des calculs permanents relatifs à l'évaluation de la qualité des liaisons, et les résultats obtenus du calculateur permettront d'évaluer, en fonction des résultats obtenus sur les bilans de liaisons pour la bande Ka, les possibilités de transmission et de diffusion dans cette bande de fréquences.

3 - Objectifs de notre système

Ce travail vise globalement à explorer la possibilité d'utilisation de la bande Ka au Cameroun et à la CRTV en particulier. Plus spécifiquement, d'une part, il vise à concevoir et réaliser un outil automatique de calcul du bilan de liaison satellite en vue de l'évaluation de la qualité

de liaison satellitaire ; d'autre part, il vise à étudier les performances offertes par la bande de fréquence Ka pour la radiodiffusion.

2016

4. Résultats attendus

A l'issue de cette étude, nous comptons mettre sur pied une plateforme automatique d'évaluation du bilan de liaison dont les spécifications sont les suivantes :

- **La disponibilité de l'outil de calcul pour des utilisateurs offline** : dans l'optique de permettre aux divers utilisateurs d'effectuer des calculs sur les liaisons en tout temps, en particulier indépendamment d'une connexion internet, donc en local.
- **L'évaluation du bilan de liaison pour toutes les bandes de fréquences** : afin de permettre une comparaison entre les résultats obtenus dans les différentes bandes et d'effectuer à tout moment, des choix de privilèges sur la bande adéquate pour la transmission.
- **La possibilité de sauvegarder les résultats sur les liaisons** : pour permettre aux différents utilisateurs de consulter les résultats antérieurs sur les liaisons et d'évaluer la qualité instantanée d'un lien par rapport aux résultats précédemment obtenus sur le même lien.

5. Généralités sur les télécommunications par satellite

Un système de télécommunications par satellite fait référence à un ensemble de services sans fil, tels la radiodiffusion, la télédiffusion, l'internet et la téléphonie mobile, auxquels viennent s'ajouter des services pour des groupes à part entière dont on peut distinguer l'armée et la navigation.

L'importance des satellites réside dans leur capacité de couverture qui permet de couvrir de grandes zones, souvent difficiles, voire impossible d'accès. Les signaux émis par ces derniers ont la particularité de pouvoir être reçus à des distances élevées, lorsque l'atmosphère s'y prête ; et enfin, les satellites permettent un déploiement rapide des services en ce sens que l'installation des équipements nécessaires pour recevoir des signaux via satellite est moins fastidieuse, et moins coûteuse en termes de temps.

Notre étude ne saurait être menée, sans avoir au préalable présenté les télécommunications par satellite suivant les différents aspects et angles du vue de ces dernières, ainsi que les caractéristiques des systèmes de télécommunications par satellite.

2016

5.1. Origine des télécommunications par satellite

L'évolution des télécommunications par satellite est l'aboutissement de la recherche de capacités de communication toujours plus grande entre les hommes, en réduisant au maximum les coûts de ces dernières. Les précurseurs de cette évolution sont sans hésiter les grandes puissances mondiales qui, lors des deux guerres mondiales, ont compris la nécessité de développer des techniques de communication, secrète notamment.

Les débuts de l'ère spatiale sont marqués par le lancement du premier satellite artificiel Soviétique, SPOUTNIK, et l'on assiste alors pendant les années qui suivent à l'explosion de services offerts par les satellites : service de courrier par satellite en 1958, transmission TV au monde entier en 1962, satellite de communications mobiles (TACSAT) en 1968, satellite avec service de communications mobiles commerciales (MARISAT) en 1976. Puis, en 1965, le premier satellite géostationnaire commercial Intelsat I (Early Bird) est lancé [2].

Les critères de caractérisation d'un système satellitaire sont généralement :

- La couverture du système,
- Les bandes de fréquence utilisées,
- La puissance et la capacité d'émission su satellite,
- La capacité des transpondeurs,
- Les techniques d'accès,
- Les techniques de modulations et de codage.

5.2. Présentation du satellite

Le satellite est défini par le Règlement des radiocommunications de l'ITU comme suit : « Corps qui tourne autour d'un autre corps de masse prépondérante et dont le mouvement est principalement déterminé, d'une façon permanente, par la force d'attraction de ce dernier. » Un satellite de télécommunication joue principalement le rôle de relais hertzien. Il est en réalité une courroie de transmission entre les stations. Il régénère le signal qu'il a reçu et le retransmet, amplifié en fréquence, aux stations réceptrices par diffusion ; il peut récolter des informations venant de plusieurs stations différentes afin de les transmettre à une station particulière. Il est constitué de la charge utile et d'une plateforme.

La charge utile comprend :

- Les **antennes d'émission et de réception** : qui définissent les zones de couverture des satellites. Elles ont pour rôle principal la réception des signaux provenant de la Terre et l'émission des signaux en direction de la Terre. Mais les contraintes de conception du satellite leur imposent des tailles réduites.
- Les **équipements électroniques** : ils sont composés des modems (qui convertissent les signaux binaires pour communiquer sur une ligne analogique telle que la ligne téléphonique ou la porteuse) et des routeurs (qui déterminent la voie optimale par laquelle le trafic du réseau doit être acheminé).
- Le **transpondeur** : aussi appelé répéteur, est un réémetteur qui reçoit la porteuse issue d'une station terrienne émettrice, l'amplifie, la convertit à la bande de fréquence adéquate pour la liaison descendante avant de la retransmettre vers la station terrienne réceptrice. On peut en avoir plusieurs dans un satellite et chacun peut posséder plusieurs canaux ayant chacun une gamme de fréquences déterminée.

La plateforme quant à elle, est constituée des sous-systèmes permettant à la charge utile de fonctionner. Les éléments que l'on peut y retrouver sont : la structure, l'alimentation électrique, le contrôle thermique, le contrôle d'attitude et d'orbite, les équipements de propulsion du satellite ; les équipements de poursuite, de télémessure et de télécommande.

5.3. Architecture d'un système de télécommunications par satellite

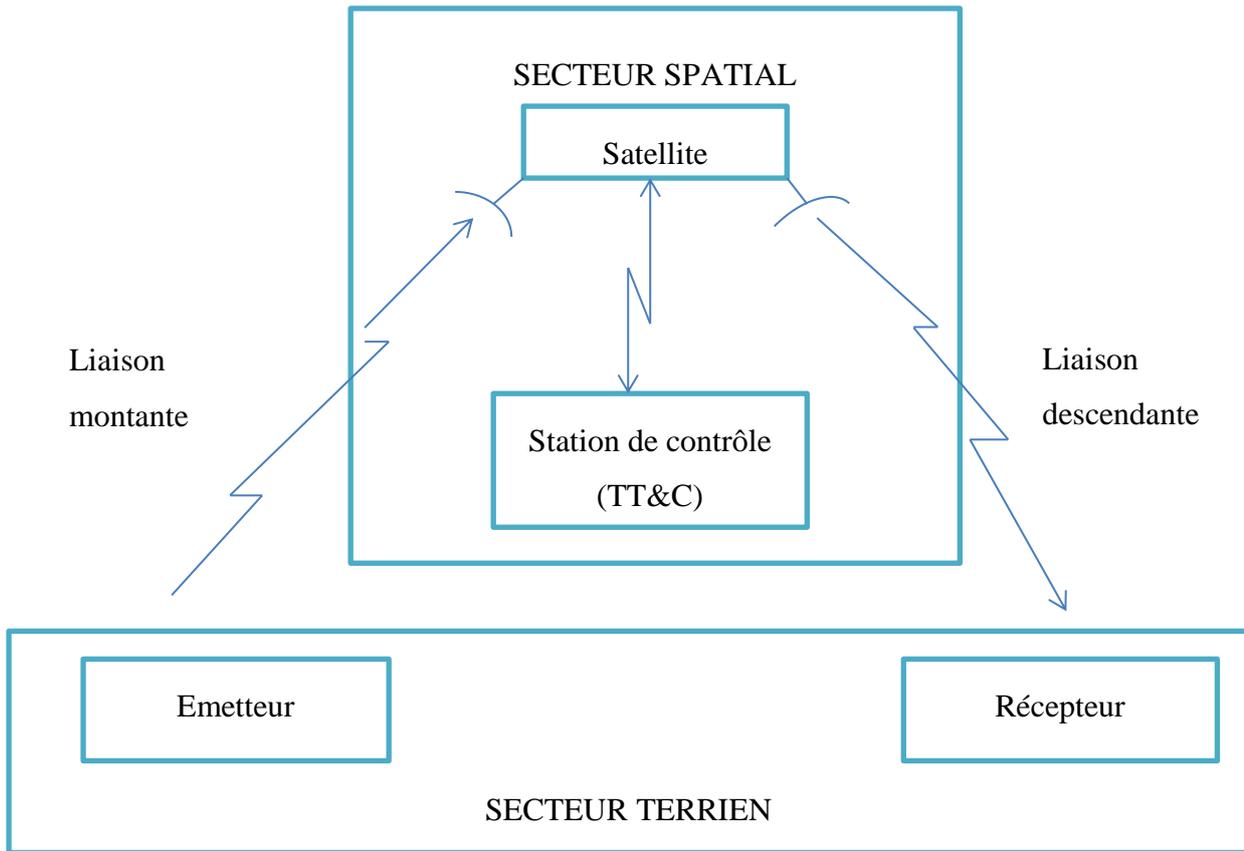
Un système de télécommunications par satellite comprend le(s) satellite(s) (secteur spatial) et des stations terriennes (secteur terrien). Les stations terriennes pouvant être à la fois émettrices et réceptrices ou spécialisées les unes en émission et les autres en réception.

5.3.1. Le secteur spatial

Celui-ci est constitué principalement du satellite et de l'ensemble des stations de poursuite, de télémétrie et de télécommande ou stations TT&C (*Tracking, Telemetry and Command*), du centre de contrôle du satellite, où sont décidées toutes les opérations traitant du maintien à poste et de la vérification des fonctions vitales du satellite.

5.3.2. Le secteur terrien

Il est constitué de l'ensemble des stations terriennes, raccordées aux terminaux des utilisateurs par un réseau Terrestre pour la plupart. Les stations, bien que jouant le même rôle, se distinguent par leurs tailles, qui varient en fonction du volume du trafic à acheminer et du type de trafic (téléphone, télévision, données). Certaines stations sont à la fois émettrices et réceptrices tandis que d'autres sont uniquement réceptrices.



TT&C = équipements de poursuite, de télémessure et de télécommande

Figure 1 : Composantes d'un système de télécommunications par satellite [4]

Tous les systèmes de télécommunications ne couvrent pas l'Afrique. En effet, un satellite ne peut couvrir qu'une portion de la Terre à la fois. Le tableau suivant répertorie quelques satellites de télécommunications qui couvrent l'Afrique et en particulier le Cameroun.

Tableau 1 : Couverture satellitaire du Cameroun

Constellation	Nom du satellite	Position	Orbites	Bandes de fréquences
ASTRA	Astra A1	28°E	GEO	Ku
EUTELSAT	Afristar 1	21°E	GEO	C
	Eutelsat	16°E	GEO	Ku
	Eutelsat	10°E	GEO	C
INMARSAT	Inmarsat 3 F1	26°E	GEO	
	Inmarsat 3 F2	40.50°W	GEO	
	Inmarsat 3 F3		GEO	
	Inmarsat 3 F4		GEO	
	Inmarsat 3 F5		GEO	
INTELSAT	Intelsat 801	29°W	GEO	C
	Intelsat 907	27.5°W	GEO	C
	Intelsat 803	20°W	GEO	C
	Intelsat 901	18°W	GEO	C
	Intelsat 904	60°W	GEO	C
AMOS	Amos 5	17°E	GEO	Ku, C, Ka
THURAYA	Thuraya	44°E	GEO	L
NSS	NSS 12	57°E	GEO	C

5.4. Orbites satellitaires

L'orbite est la trajectoire que suit un objet qui tourne autour d'un autre objet. Les orbites satellitaires peuvent avoir des formes très variées (circulaire, elliptique), et une orbite détermine la durée de vie de l'engin qu'on y place et les fonctions que celui-ci pourra remplir. Les éléments caractéristiques d'une orbite sont principalement son altitude c'est-à-dire la distance qui sépare cette orbite de la surface de la Terre, sa forme, qui peut être circulaire ou elliptique, et son mouvement par rapport à la Terre. On en distingue plusieurs types parmi lesquels :

- Orbite LEO (*Low Earth Orbit*) : c'est l'orbite basse située entre 200 et 2000km environ, plus ou moins circulaire, avec une inclinaison par rapport à l'équateur dépendant de la mission du satellite. Cette orbite permet notamment un survol des régions plus proches des pôles et les satellites exploitant cette orbite ne sont visibles que 15 minutes successives depuis un point du globe, ce qui empêche des missions de communications permanentes et d'une certaine importance. Un autre inconvénient de cette orbite est la restitution des données car, le satellite n'étant pas visible en permanence, il faut profiter de ses passages au-dessus des antennes de réception pour

capter les données recueillies. La solution à ces différents manquements se trouve dans la mise sur pieds de constellations de satellites avec un nombre suffisant de satellites pour garantir à chaque instant que chaque point du globe voit au moins l'un de ces satellites.

- **Orbite MEO (*Medium Earth Orbit*)** : elle offre les mêmes services que l'orbite LEO mais avec une altitude plus élevée, se situant entre 2000 et 35786 Kms. Par rapport aux satellites en orbite basse, la durée de visibilité d'un satellite ici augmente, tandis que la distance élevée par rapport à la Terre augmente la difficulté de transmission des données en termes de précision, de puissance et de qualité.
- **Orbite GEO (*Geostationary Earth Orbit*)** : elle est placée dans le plan équatorial et sa caractéristique principale, raison première de son exploitation élevée pour les systèmes et services de télécommunications par satellite, est que pour un observateur Terrestre, un satellite placé sur cette orbite apparaît immobile dans le ciel. Ceci étant dû au fait que la période de révolution du satellite, c'est-à-dire le temps qu'il met pour parcourir le périmètre du cercle représentatif de sa trajectoire, est la même que celle de la Terre, soit 23 heures 56 minutes et 4 secondes. Une autre caractéristique de cette orbite est que les satellites placés sur cette dernière tournent généralement dans le même sens que la planète Terre.

5.5. Bandes de fréquences et techniques d'accès

5.5.1. Bandes de fréquences

Les télécommunications par satellite, en tant que communications radio ou sans fil, utilisent le spectre radio. L'évolution croissante des systèmes satellitaires en orbite et des systèmes de télécommunications en général crée un intérêt sans cesse grandissant pour l'attribution des bandes de fréquences aux différents opérateurs satellitaires. La partie la plus utilisée par ces derniers et donc la plus attractive et sujette à de nombreuses sollicitations est celle s'étalant entre 1 GHz et 30 GHz. Les fréquences y sont distinguées et réparties comme suit :

Tableau 2 : Nomenclature des bandes de fréquences [5]

Numéro de la bande	Symboles (en anglais)	Gamme de fréquences (limite inférieure exclue, limite supérieure incluse)	Subdivision métrique correspondante	Abréviations métriques pour les bandes
3	ULF	300-3 000 Hz	Ondes hectokilométriques	B.hkm
4	VLF	3-30 kHz	Ondes myriamétriques	B.Mam
5	LF	30-300 kHz	Ondes kilométriques	B.km
6	MF	300-3 000 kHz	Ondes hectométriques	B.hm
7	HF	3-30 MHz	Ondes décamétriques	B.dam
8	VHF	30-300 MHz	Ondes métriques	B.m
9	UHF	300-3 000 MHz	Ondes décimétriques	B.dm
10	SHF	3-30 GHz	Ondes centimétriques	B.cm
11	EHF	30-300 GHz	Ondes millimétriques	B.mm
12		300-3 000 GHz	Ondes décimillimétriques	B.dmm
13		3-30 THz	Ondes centimillimétriques	B.cmm
14		30-300 THz	Ondes micrométriques	B.µm
15		300-3 000 THz	Ondes décimicrométriques	B.dµm

Tableau 3 : Bandes de fréquences et services

Bande	Lien montant	Lien descendant	Services
L	2 GHz	1 GHz	Service de positionnement mobile par satellite
S	4 GHz	2 GHz	Service audio radio numérique, recherche spatiale
C	8 GHz	4 GHz	Services fixes par satellite
X	12.5 GHz	8 GHz	Services fixes par satellite, communications militaires, satellites d'observation de la Terre
Ku	18GHz	12.5 GHz	Service de diffusion par satellite, services fixes par satellite
K	26.5 GHz	18 GHz	Service de diffusion par satellite, service fixe par satellite
Ka	40 GHz	26.5 GHz	Services de diffusion par satellite, liaisons inter satellitaires, imagerie par satellite

5.5.2. Techniques d'accès

Les techniques d'accès au satellite définissent la manière dont les stations au sol partagent la bande passant satellitaire, c'est-à-dire la plage de fréquences attribuée au satellite. On distingue deux grands groupes de techniques d'accès : les techniques d'accès déterministes ou fixes et les techniques aléatoires.

5.5.2.1. Les techniques d'accès fixes ou FAMA (*Fixed Assignment Multiple Access*)

Elles regroupent la FDMA (*Frequency Divison Multiple Access*), la TDMA (*Time Divison Multiple Access*) et la CDMA (*Code Divison Multiple Access*).

- **FDMA :** La FDMA est une technique dans laquelle, pendant toute la période de temps, une fréquence est allouée pour chaque station, ce qui permet à tous les utilisateurs d'exploiter simultanément la bande de fréquence. Dans cette technique, l'utilisateur n'a aucune limite dans le temps ; par contre il peut utiliser seulement une partie limitée de la bande de fréquence. On distingue deux formes de FDMA : le FDMA-FAMA dans lequel chaque station de transmission, active ou non, possède un canal de transmission, ce qui peut créer une sous-exploitation de la bande de fréquence, et le FDMA-DAMA, dans lequel les canaux sont alloués aux usagers actifs, et après qu'un usager aie fini d'utiliser un canal, ledit canal est alloué à un autre utilisateur actif [6].

Pour l'implémenter, un filtre passe-bas est utilisé au niveau de l'émetteur afin de s'assurer que la bande passante du message à transmettre est limitée à une largeur définie au préalable. Chaque signal module une porteuse différente et les signaux issus de tous les modulateurs sont superposés et transmis par le canal. En réception, les porteuses sont séparées par des filtres passe-bande placés en parallèle et centrés sur les fréquences porteuses des messages à détecter. La largeur de ces filtres est bien déterminée au préalable afin de ne pas tronquer le spectre du signal. A la sortie du filtre passe-bande, le signal est démodulé et traverse un filtre passe-bas permettant d'écarter les composantes indésirables et de récupérer le message en bande de base.

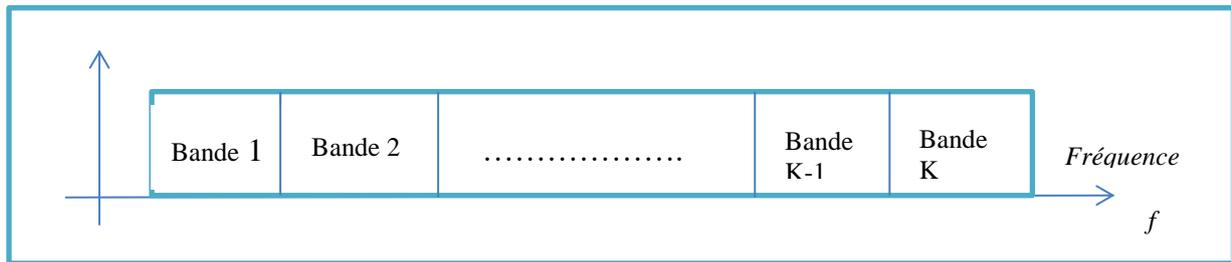


Figure 2 : Schéma d'un multiplexage en fréquence FDMA[6]

Les avantages de cette technique sont : faible complexité, modulation à faible débit, bonne gestion des ressources de transmission en cas de faible trafic. Ses inconvénients principaux résident dans le fait que si une ou plusieurs liaisons sont inutilisées, l'on perd les bandes correspondantes.

- **TDMA** : Le TDMA ou accès multiple à répartition dans le temps est une technique mise au point pour gérer les accès à une ressource donnée. C'est un mode de multiplexage qui permet de transmettre plusieurs signaux à travers un seul canal. Le principe est de découper le temps et de le partager entre plusieurs utilisateurs, offrant la possibilité d'utiliser une seule porteuse pour plusieurs utilisateurs. Chaque utilisateur a ainsi un intervalle bien précis pour envoyer ses données et durant la transmission d'un utilisateur quelconque, ce dernier occupera toute la bande passante disponible.

Ici, la porteuse est divisée en plusieurs séquences appelées « burst », sachant qu'un burst est envoyé par intervalle de temps. Dans le cadre d'une communication par satellite, on découpe le temps en tranches que l'on affecte successivement aux différentes stations Terrestres. Toutes les stations émettent alors avec la même fréquence sur l'ensemble de la bande passante, mais successivement.

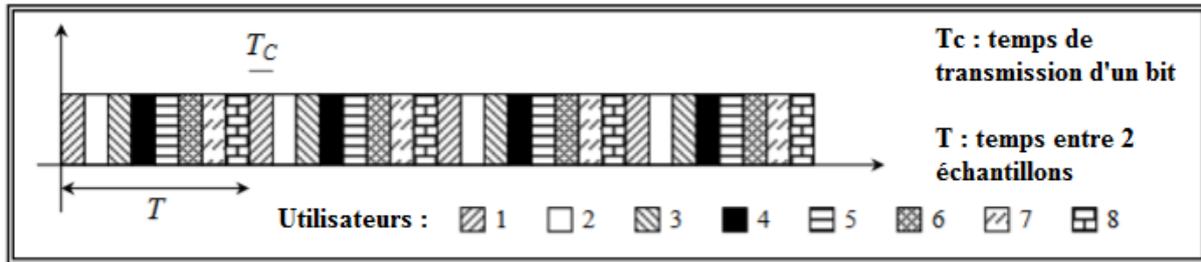


Figure 3 : Schéma d'un multiplexage temporel TDMA [6]

Cette technique offre, en termes d'avantages, un coût réduit de la station de base, une souplesse de modification sur le débit transmis, mais présente une gestion un peu complexe et nécessite un ajout de bit supplémentaire pour la signalisation et la synchronisation.

- **CDMA** : Le CDMA consiste à utiliser une technique d'étalement par codes (DS-SS), en utilisant une famille de codes orthogonaux ou pseudo-orthogonaux. Il permet la transmission simultanée de plusieurs canaux, chacun étant étalé en temps et en fréquence (bonne résistance au *fading* plat et au *fading* rapide).

Ses avantages résident dans : sa résistance aux interférences, sa confidentialité (faible probabilité d'interception), sa faible consommation en puissance ; toutefois, le débit utilisé par utilisateur reste faible par rapport à la largeur de bande occupée.

5.5.2.2. Les techniques d'accès aléatoires

L'accès aléatoire consiste, pour les stations terriennes, à émettre dès qu'elles ont un paquet de données en leur possession. S'il y'a collision, elles s'en aperçoivent puisqu'elles écoutent les signaux émis sur le canal. Les paquets perdus seront retransmis ultérieurement après un temps tiré de façon aléatoire pour éviter au maximum de nouvelles collisions. On distingue principalement trois catégories d'accès aléatoire :

- La technique de base nommée ALOHA,
- La politique ALOHA en tranche,
- Les techniques de réservation ALOHA

6. Généralités sur les bilans de liaison

6.1. Principe du bilan de liaison

2016

Afin d'analyser les performances d'un système de communications en général et du système de communications par satellite en particulier, il est nécessaire d'évaluer, en fonction des paramètres de fonctionnement du système, la liaison établie entre les différentes parties du système. En d'autres termes, il s'agit d'évaluer la qualité de la liaison entre l'émetteur et le récepteur dans un système particulier.

Le bilan de liaison satellitaire est de manière basique la somme des pertes entre l'émetteur et le récepteur, et vice versa. Il s'évalue donc autant pour la liaison montante (émetteur de la station au sol et équipements de réception du satellite) que pour la liaison descendante (émetteur du satellite et équipement de réception du récepteur). Ces pertes sont soustraites de la somme des gains sur la liaison. Le niveau du signal obtenu en sortie du système doit posséder un certain seuil afin que ce dernier puisse être perçu par les appareils de réception de la station au sol. L'importance de l'évaluation de la liaison se retrouve au niveau du récepteur car c'est la qualité du signal reçu qui témoigne de la qualité de la liaison établie. Plus la qualité du signal est bonne, plus la liaison est fiable et performante.

Le bilan de liaison dans ce contexte revient donc à la puissance reçue par le récepteur, qui correspond à la puissance isotrope rayonnée en direction du récepteur, divisée par les pertes sur le trajet de réception [6].

Il s'exprime par l'équation suivante :

$$P_r = P_e * G_e * G_r * \frac{1}{L_t} \quad (1)$$

Où : P_e est la puissance fournie à l'antenne d'émission (en Watt)

25 G_e est le gain de l'antenne d'émission

G_r est le gain de l'antenne de réception

L_t est la somme des pertes de la liaison

Le bilan des pertes sur la liaison s'exprime comme suit :

$$L_t = L_{FS} * L_{atm} * L_{pol} * L_{rec} \quad (2)$$

Où: L_{FS} représente l'atténuation due à la propagation en espace libre

L_{atm} représente les pertes atmosphériques

L_{pol} représente les pertes de polarisation

L_{rec} représente les pertes dues au récepteur

Les différents paramètres dont il faut tenir compte dans l'évaluation d'un bilan de liaison sont les suivants :

6.1.1. La PIRE

La PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente) est la puissance effectivement rayonnée après avoir soustrait de la puissance en entrée de l'émetteur, les pertes dues aux composants de l'émetteur. Le paramètre fondamental qui permet de réduire l'effet des pertes sur la liaison est le gain de l'antenne. Le gain s'évalue tant sur les antennes d'émission que les antennes de réception. Lorsque l'antenne d'émission est la même que l'antenne de réception, ce gain a la même valeur moyennant la condition que la fréquence d'émission soit la même que la fréquence de réception.

6.1.2. La sensibilité du récepteur

La sensibilité du récepteur est exprimée par le paramètre G/T qui indique la qualité de l'émetteur en termes de niveau de bruit. Il est calculé en faisant le ratio entre le gain total de l'émetteur, incluant l'amplificateur, l'antenne et les autres équipements d'émission, et le bruit total sur le lien montant.

26

6.1.3. La situation géographique de la station au sol

La latitude et la longitude indiquent la localisation des équipements terminaux de l'émetteur, ou du récepteur, à la surface de la Terre. Ces différents paramètres sont exprimés

en degrés. Lorsqu'un satellite est situé près de l'équateur, à une latitude de 0 degré, seule la longitude est suffisante pour identifier la localisation du satellite dans l'espace. L'angle d'élévation quant à lui indique l'angle comparativement à l'angle de référence qui vaut 0 degrés, dans l'optique d'avoir une vue directe entre la station au sol et le satellite. Tandis que l'azimut est l'angle entre le nord magnétique et la direction du satellite.

6.1.4. Les pertes sur la liaison

Les pertes enregistrées sur le trajet de l'onde radio font référence au niveau d'atténuation entre le signal émis par l'antenne de la station d'émission (après le système d'antennes), en comparaison au niveau du signal en réception au niveau de l'antenne du récepteur (avant le système d'antenne). Ces pertes peuvent être déterminées de plusieurs manières, mais la manière la plus simple de les évaluer est en évaluant les pertes en espace libre subies par le signal car celles-ci ne dépendent que des paramètres de liaison. Elles s'expriment par la formule :

$$L_{FS} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4\pi d f}{c} \right)^2 \quad (3)$$

Ces pertes sont évaluées pour un signal dans les conditions de propagation en ligne de vue directe entre le satellite et la station au sol, c'est-à-dire sans obstacle sur le trajet du signal, pouvant causer des atténuations supplémentaires ou des réflexions du signal.

6.2. Les causes de dégradation du signal

La qualité du signal transmis et reçu peut être dégradée, suite à l'effet de nombreux facteurs, pouvant être autant d'origine naturelle qu'artificielle. Les causes naturelles de dégradation du signal sont principalement les atténuations subies par celui-ci au long de son trajet, sous l'effet des différents paramètres géophysiques, en particulier le soleil, les nuages, la pluie, mais aussi des différentes couches atmosphériques traversées par le signal ; tandis que les causes artificielles proviennent essentiellement de l'action des composants constitutifs des appareils du système, les composants électroniques.

Tableau 4 : Classification des atténuations en transmissions [7]

TRANSMISSION LOSSES	PROPAGATION LOSSES	FREE SPACE LOSSES			
		ATMOSPHERIC LOSSES	Ionospheric effects	Faraday rotation Scintillation effects	
			Tropospheric effects	Attenuation	Rain attenuation
				Gas absorption	Depolarization
				Sky noise	
				Local effects	
				POINTING LOSSES	
	LOCAL LOSSES	EQUIPMENT LOSSES	Feeder losses		
		ENVIRONMENT LOSSES			

6.2.1. Les pertes de propagation

6.2.1.1. Pertes en espace libre

Elles sont les plus importantes en termes de perte de puissance du signal. Afin d'évaluer les pertes en espace libre, il est important de déterminer les pertes dans le cas d'une propagation sous un ciel clair. Celles-ci restent constantes avec le temps. Elles se calculent comme indiqué par la formule :

$$PEL = 10 \log \left(\frac{4\pi r f}{c} \right)^2 \quad (4)$$

Où : f est la fréquence de communication sur la liaison

r est la distance entre l'émetteur et le récepteur

PEL sont les pertes en espace libre

6.2.1.2. Pertes atmosphériques

Elles résultent de l'absorption de l'énergie du signal par les gaz atmosphériques. On en distingue deux principaux types : l'absorption et l'atténuation atmosphérique, qui résultent majoritairement des effets de l'ionosphère et de la troposphère [8].

a) Les effets de l'ionosphère

Les ondes radio transmises par le satellite en direction de la Terre et vice versa, traversent l'ionosphère, la couche la plus haute de l'atmosphère. Celle-ci contient des particules ionisées provenant des radiations solaires. Les électrons libres forment des nuages ou couches qui résultent en ce que l'on qualifie de perturbations ionosphériques dans le déplacement de l'onde. Les effets résultant sont : la rotation de la polarisation, les effets de scintillation, l'absorption du signal, la variation de la direction d'arrivée du signal, l'incrémentement du délai de propagation du signal, la dispersion du signal, le changement de fréquence. Les effets les plus importants sont la rotation de polarisation et les effets de scintillation, qui sont d'une grande influence pour les communications par satellite.

- La **rotation de la polarisation** : lorsque l'onde radio passe au travers de l'ionosphère, il rencontre les nuages d'électrons qui se déplacent conformément au champ magnétique de la Terre. A cause de la rencontre, la direction de ces électrons ne sera plus parallèle au champ électrique de l'onde, changeant ainsi sa polarisation.
- Les **effets de scintillation** : ceux-ci résultent de la différence des indices de réfraction dans l'atmosphère et de l'effet multi trajet, dus aux différentes directions que les rayons diffractés prendront dans l'atmosphère, et se manifestent en changement de l'amplitude, de la phase, de la polarisation et de l'angle d'arrivée des ondes radio au niveau du réception.

Tableau 5 : Classification des pertes atmosphériques en fonction de la fréquence [9]

Atmospheric loss	Frequency(GHz)
0.25	$2 < f < 5$
0.33	$5 < f < 10$
0.53	$10 < f < 13$
0.73	$13 < f$

b) Les effets de la troposphère

La troposphère est une couche de l'atmosphère composée de molécules de plusieurs composés chimiques et de gaz atmosphériques. Lors de sa traversée par les ondes radio, ces dernières peuvent subir des effets tels que la dispersion, la dépolarisation, l'absorption et par conséquent être atténuée.

- **L'atténuation** : lorsque l'onde radio traverse la troposphère, l'énergie radio fréquence va être convertie en énergie thermique, ce qui aura pour effet d'atténuer le signal. Elle va aussi être dispersée dans plusieurs directions de l'espace, ce qui implique qu'une partie de l'onde ne parviendra pas à l'antenne de la station de réception. Ce phénomène est plus présent pour les bandes de fréquence se situant au-dessus de 10GHz [9].

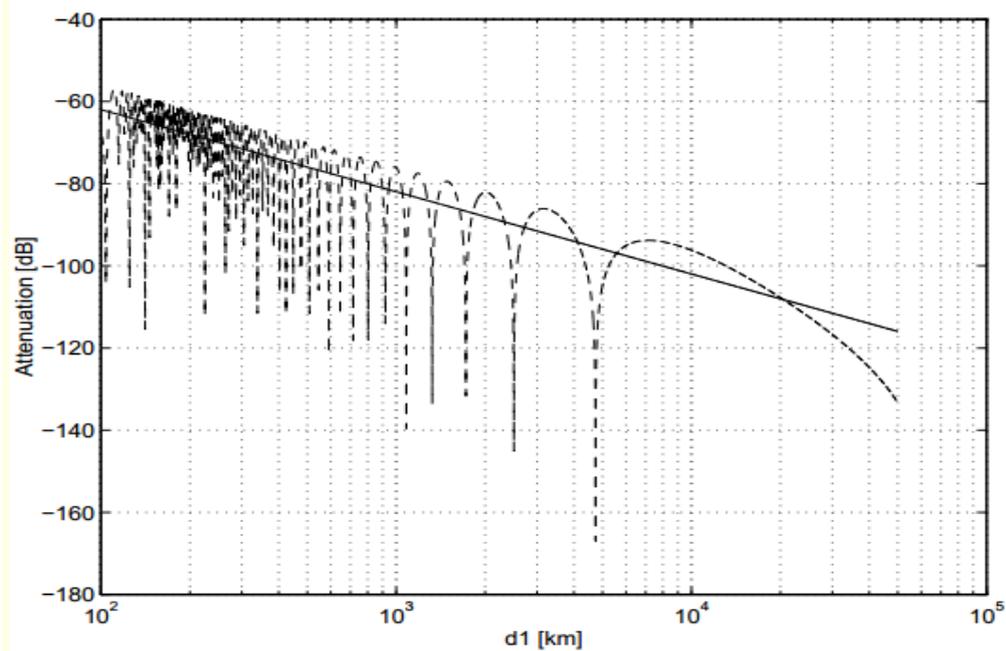


Figure 4 : Atténuation du signal en fonction de la distance – trait continu : en espace libre et trait interrompu en présence d'une réflexion [10]

- **Absorption due aux gaz :** dans des conditions normales, seuls l'oxygène et la vapeur d'eau contribuent à l'absorption atmosphérique ; les autres gaz ne prennent de l'importance que lorsque l'air est très sec, au-delà des 70GHz. Par conséquent, les pertes dues à l'absorption atmosphérique varient en fonction de la fréquence. Elle est représentée dans le calcul du bilan de liaison par le paramètre L_{abs} .

En dehors de ces deux catégories de pertes, on distingue également les pertes locales. Elles font ici référence à la proximité des stations terriennes, qui peut être source d'interférences pour le signal reçu. Mais ce facteur est généralement peu important et même négligeable pour les liaisons satellitaires.

6.2.1.3. Pertes dues au pointage des antennes

Pour une réception idéale, la valeur des pertes sont dues au défaut d'alignement des stations émettrices et réceptrices. Ce qui implique que, une fois que les deux stations sont alignées à 100%, le gain maximum de l'antenne de la station au sol est atteint. On distingue deux types de défauts d'alignement :

- Les *off-axis loss* au niveau des satellites, considérés comme défaut de fabrication de l'antenne ;
- Les *off-axis loss* au niveau de la station au sol, représentant les pertes dues au pointage de l'antenne.

6.2.2. Les pertes locales

Nous faisons ici référence aux pertes sur la qualité du signal au niveau des stations terriennes.

6.2.2.1. Pertes dues aux équipements

Les pertes dans le *feeder* se manifestent au niveau des composants se trouvant entre l'antenne de réception et l'équipement de réception du récepteur (télévision, téléphone portable...), tels que les coupleurs, les filtres, les guides d'ondes. Elles sont présentes autant en émission qu'en réception, et se manifestent dans le cas de l'émission entre l'antenne d'émission et la sortie du HPA (High Power Amplifier ou amplificateur de grande puissance).

6.2.2.2. Pertes dues à l'environnement

Elles dépendent de la région géographique dans laquelle se situe la station terrienne en liaison avec le satellite. En effet, chaque région possède ses caractéristiques, en fonction de ses coordonnées géographiques, ce qui peut dans certains cas provoquer une variation du signal reçu, comme par exemple atténuer celui-ci dans le cas où la distance entre la station au sol et le satellite est élevée ou dans les zones tropicales sujettes à de forts taux de précipitations.

6.2.3. Les autres facteurs influençant le signal

En dehors des facteurs présentés ci-dessus, on distingue d'autres paramètres qui peuvent avoir une influence non négligeable sur le signal et sa propagation.

- **L'éclipse solaire** : ce sont des pertes de communication entre le satellite et les stations terriennes dues au fait que le soleil obscurcisse le satellite pendant une certaine période. Dans ce cas-là, la station au sol voit le soleil derrière le satellite. Ce phénomène a lieu 32 ou 6 jours avant l'équinoxe et peut durer au maximum 8 minutes, soit un total de 60 minutes par an. Il se manifeste par une élévation de la température de bruit du système,

qui peut entraîner des conséquences négatives sur le système de communication. Ce phénomène affecte tous les types de satellites, excepté les satellites LEO.

- **L'éclipse satellitaire** : il survient lorsque le satellite croise le cône d'ombrage de la Terre. Elles apparaissent le 21 mars et le 23 septembre ²⁰¹⁶ et durent au maximum 70 minutes, pouvant provoquer des changements en température dans le système, notamment une élévation de la température du système. Durant cette éclipse, les satellites fonctionnent sur batterie et certains transpondeurs sont déconnectés. Ce phénomène n'affecte que les satellites géosynchrones du fait de leur position fixe par rapport à la Terre [11].

6.3. Etablissement d'un bilan de liaison

L'établissement d'un bilan de liaison a pour finalité principale, l'évaluation de la qualité de la liaison de bout en bout lors d'une transmission de manière détaillée, afin de déterminer et de comprendre les pertes subies par le signal le long de son parcours et de trouver le taux de pertes admissibles pour avoir, malgré ces pertes, un signal admissible pour une connexion entre un émetteur et un récepteur. La chaîne totale de transmission de l'information comprend la liaison montante qui va de la station au sol au satellite et la liaison descendante qui va du satellite à la station au sol. La puissance du signal reçu dépend de la puissance transmise en émission, de la somme des gains et des pertes le long du trajet du signal, et des caractéristiques du récepteur et de ses antennes. Ainsi, un bilan de liaison fait donc intervenir la station émettrice, le satellite qui régénère le signal pour le diffuser ou le transmettre, et la station réceptrice qui termine cette chaîne de transmission.

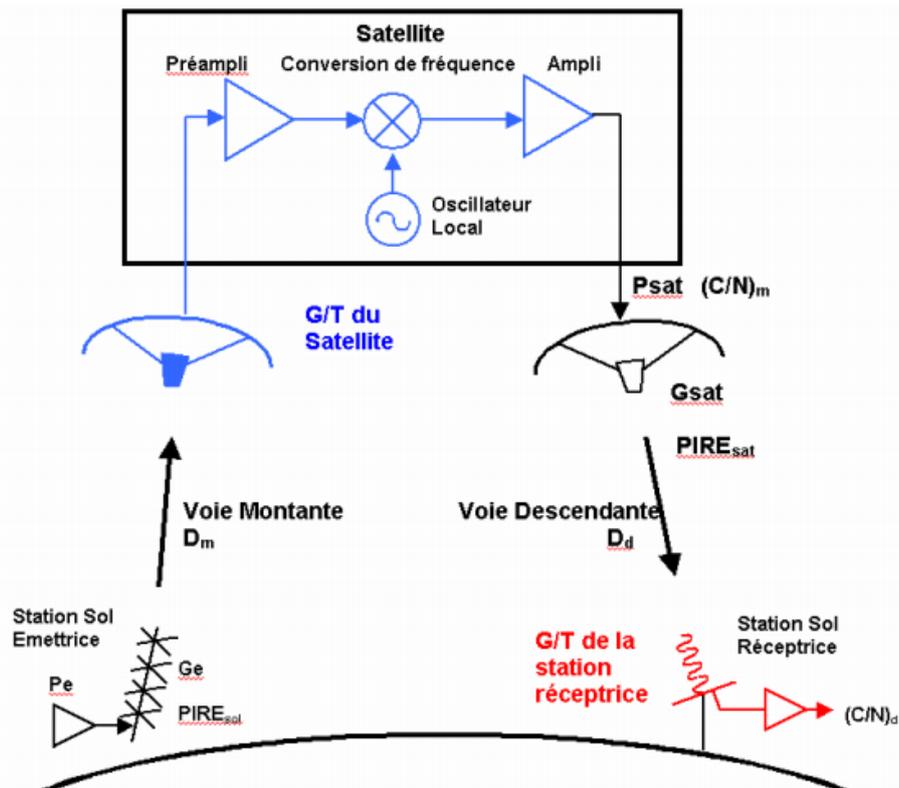


Figure 5 : Synoptique d'une liaison via satellite [12]

Le processus d'établissement de la communication entre les différentes entités du système prend naissance au niveau de la station émettrice.

- La station émettrice après tous les traitements du signal en bande de base, la correction d'erreurs et la modulation, envoie le signal à travers le faisceau hertzien au satellite en communication avec ladite station.
 - A la réception du signal par le satellite, ce dernier est filtré, pré amplifié et une conversion de fréquence est faite afin d'éviter les interférences sur le lien montant et le lien descendant.
 - Une fois ces différents traitements effectués par le satellite, le signal est amplifié à nouveau par un amplificateur de grande puissance et filtré, puis retransmis sur le lien descendant.
- 34 • Le signal reçu par l'antenne de la station réceptrice peut donc être exploité.

Les différents paramètres généraux entrant dans l'établissement du bilan de liaison sont également présentés avec :

- P_e : Puissance de l'antenne émettrice
- G_e : gain de l'antenne émettrice
- $PIRE_{sol}$: la PIRE de l'antenne émettrice
- G/T_{sat} : la sensibilité des antennes réceptrices du satellite
- P_{sat} : la puissance d'émission des antennes du satellite
- G_{sat} : le Gain des antennes d'émission du satellite
- $PIRE_{sat}$: la PIRE des antennes d'émission du satellite
- C/N : Facteur de bruit en réception de la station réceptrice

7. La bande Ka

Avec l'émergence de nouvelles applications et de nouveaux services multimédias, les communications nécessitent de plus en plus, une communication large bande. L'on se tourne alors vers les possibilités d'exploitation de nouvelles bandes de fréquences pouvant fournir des communications large bande, en particulier à l'heure actuelle, vers la bande Ka.

Cette bande reste, encore sous-exploitée, en particulier dans les zones tropicales et les zones à fort taux de précipitations, et son exploitation est encore destinée à certains services spécifiques. Mais de plus en plus, l'intérêt général des opérateurs de télécommunications par satellite se manifeste pour cette bande et des études pour son éventuelle exploitation sont réalisées dans les zones sujettes à de forts taux de précipitations.

7.1. Les systèmes satellitaires et la bande Ka

L'idée même de l'exploitation de cette bande de fréquence nait du constat de saturation des autres bandes de fréquences exploitées jusqu'à l'heure actuelle, particulièrement la bande C et la bande Ku. Son exploitation offre l'avantage de disposer de canaux plus larges pouvant supporter un grand nombre d'utilisateurs, de réduire les dimensions des terminaux utilisateurs et des antennes employées.

Malgré les difficultés que présentent les systèmes de télécommunications par satellite opérant en bande Ka du fait de sa sensibilité élevée aux perturbations atmosphériques, certains systèmes exploitant cette bande sont déployés, parmi lesquels :

2016

Tableau 6 : Quelques systèmes satellitaires exploitant la bande Ka[13]

Système	Couverture	Lien montant / descendant	Débit (Kbps)
DFS –Kopernikus (Allemagne)	Régionale GEO	29.58GHz / 19.78 GHz	64-2048
ITALSAT Multibeam Global Payload (Italie)	Régionale GEO	27.5-30 GHz /18.5-20.0 GHz	32-128
CS-2 / CS-3 (Japon)	Régionale GEO	27.515-28.995 GHz / 17.775-19.19 GHz	192-6144
Teledesic (US)	Globale LEO	28.6-29.1 GHz / 18.8-19.3 GHz	16-23000

7.2. Classifications des atténuations en bande Ka

La dégradation du signal en bande Ka provient essentiellement des conditions atmosphériques et météorologiques. Les conditions atmosphériques sont celles générées par les éléments qui sont présents dans l'atmosphère terrestre de façon permanente tels que l'eau ou les gaz, tandis que les conditions météorologiques englobent les facteurs dont la présence est fonction du temps et de l'espace, à l'instar des nuages ou des précipitations. Ces dernières sont celles ayant le rôle le plus important dans l'atténuation du signal.

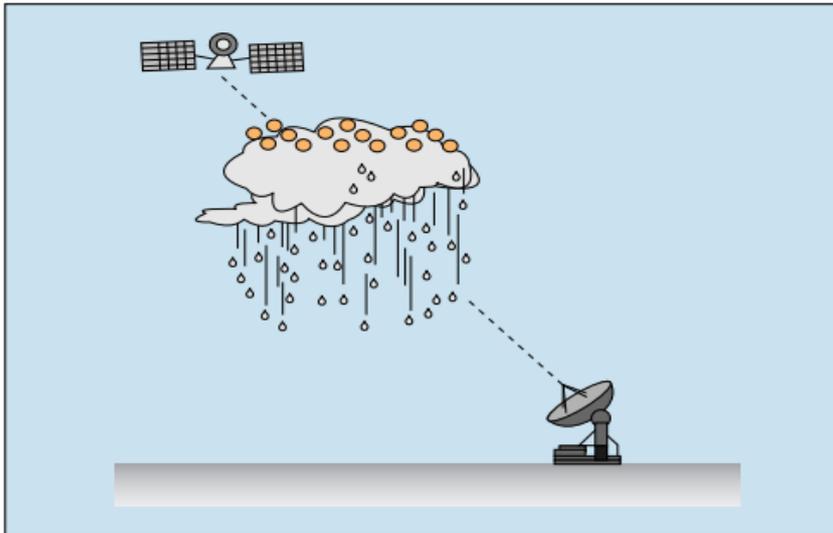


Figure 6 : Trajet d'un signal affecté par les facteurs atmosphériques

7.2.1. Atténuation due aux nuages

Les effets des nuages sur le signal sont fonction de la densité de ces derniers, ainsi que de leur épaisseur. La cause typique d'atténuation due aux nuages est la présence de vapeur d'eau dans leur constitution. Mais l'affaiblissement dû à ceux-ci est plus élevée que celui causé par la vapeur d'eau.

La valeur de l'atténuation à 20 GHz est de 0.4 dB pendant 50% du temps d'une année moyenne et de 0.8 dB à 30 GHz.

7.2.2. Atténuation due aux précipitations

L'atténuation due aux précipitations est fonction de la pluviométrie et des caractéristiques des précipitations. Dans les zones tropicales, on rencontre des précipitations de faible étendue, caractérisées par une forte intensité et une durée dans le temps relativement faible par rapport à celles rencontrées dans les pays d'Europe et les autres zones.

L'absorption météorologique est la principale cause de dégradation du signal dans la tranche de fréquences des 10 à 30 GHz. Ce qui constitue le premier inconvénient dans l'exploitation des bandes de fréquences Ku et Ka.

La figure suivante illustre l'atténuation due aux précipitations pour les différentes bandes de fréquence entre 12GHz et 40GHz.

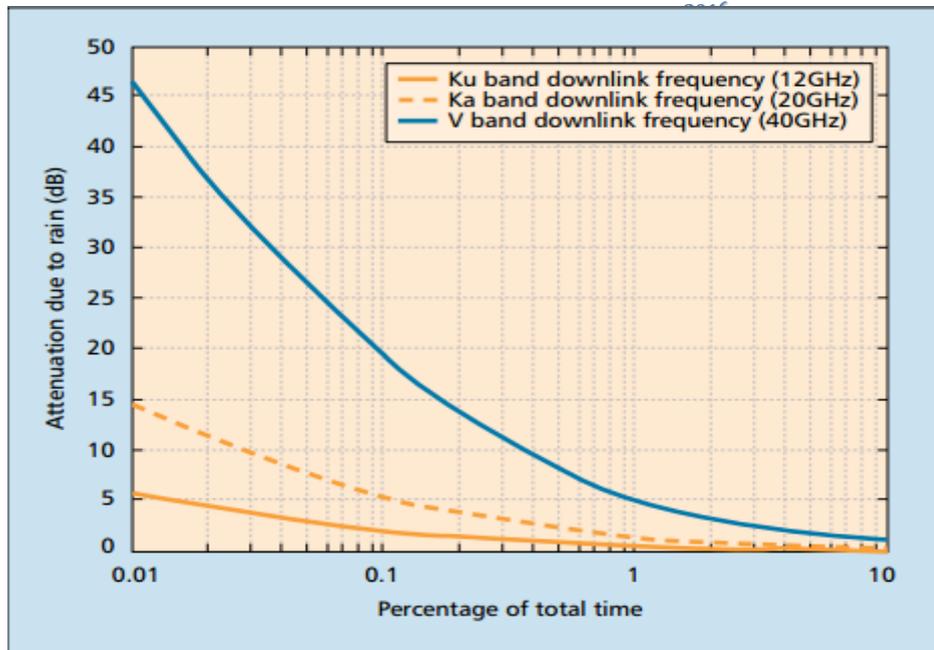


Figure 7 : Atténuation due à la pluie en Ku, Ka et V[14]

7.2.3. Atténuation due aux gaz

L'établissement d'un bilan de liaison dans les bandes de fréquences des 20 GHz doit tenir compte de l'atténuation due aux gaz atmosphériques. L'oxygène de l'air est en particulier le composant gazeux qui affecte le plus la qualité du signal en bande Ka. Cette atténuation étant présente de façon constante et permanente, il est pratiquement inutile d'en tenir compte lors de l'élaboration de techniques de compensation de pertes du signal.

8. ETAT DE L'ART

Les récents travaux et recherches sur l'étude de la diffusion en bande Ka, l'exploitation de cette bande et les opportunités et avantages offerts par cette dernière, constituent un ensemble de résultats fondamentaux dans le développement de systèmes de télécommunications par satellite, plus particulièrement dans la radiodiffusion par satellite.

8.1. Couverture nuageuse et fréquence des précipitations

La couverture nuageuse de basse altitude et la fréquence des précipitations sont des facteurs importants pour une compréhension de la propagation du signal dans les six principales zones climatiques d'Afrique, comprenant cinq types de nuages de basse altitude : le stratus (St), le stratocumulus (Sc), le cumulus (Cu), le cumulonimbus (Cb) et le nimbostratus (Ns). [15]

Le taux de nuages de basse altitude était plus élevé dans les forêts tropicales (36.3%) du fait de l'incidence des nuages Sc, Cb et Cu. Les nuages de type stratocumulus sont connus pour produire un taux élevé de brouillard et leur présence préface un climat dégradé ou mauvais. La fréquence mensuelle de précipitations atteint son minimum en août dans le sud de l'Afrique et son pic dans le nord de l'Afrique excepté pour deux régions : le désert aride du Sahara, qui atteint son pic en Janvier, et la forêt tropicale qui possède deux maxima, en Avril et en Octobre, ces maxima correspondants à la saison des pluies dans cette zone climatique [15].

Le taux le plus élevé de ciel clair est rencontré en Afrique du Sud semi-aride (67.8%), suivi par le désert aride du Sahara (48%), la savane Sud-Africaine (43.2%), la savane nord-africaine (31.9%), l'Afrique du nord semi-aride (29%) et la forêt tropicale (17.5%). La forêt tropicale possède le taux le plus faible de ciel clair du fait de son taux élevé de précipitations et d'accumulation de précipitations, qui varie entre 1800 mm et 3000 mm par an [15].

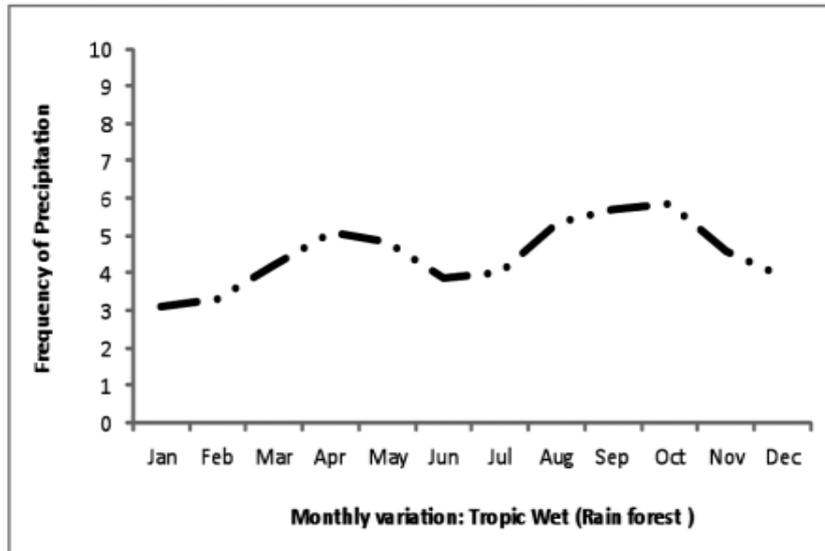


Figure 8 : fréquence des précipitations en zone tropicale africaine [15]

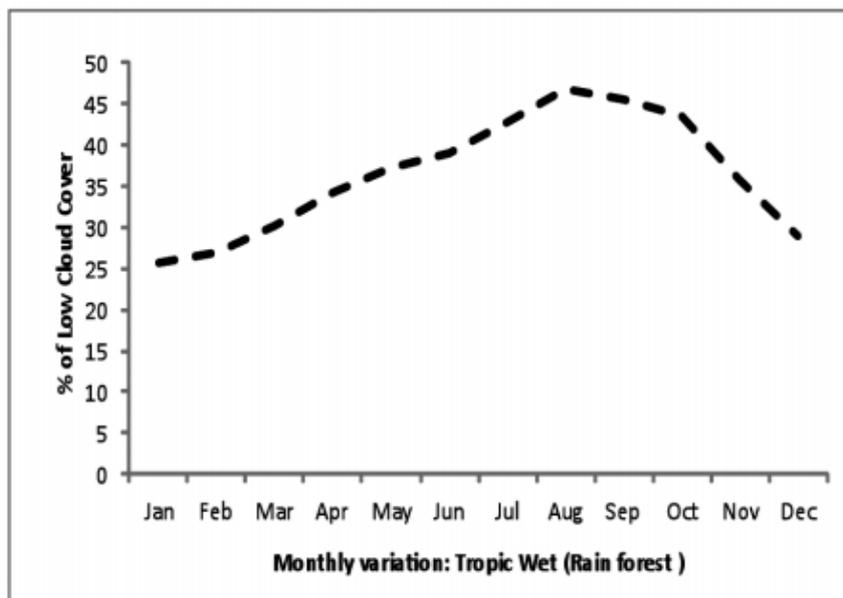


Figure 9 : pourcentage de couverture des nuages de basse altitude en zone tropicale africaine [15]

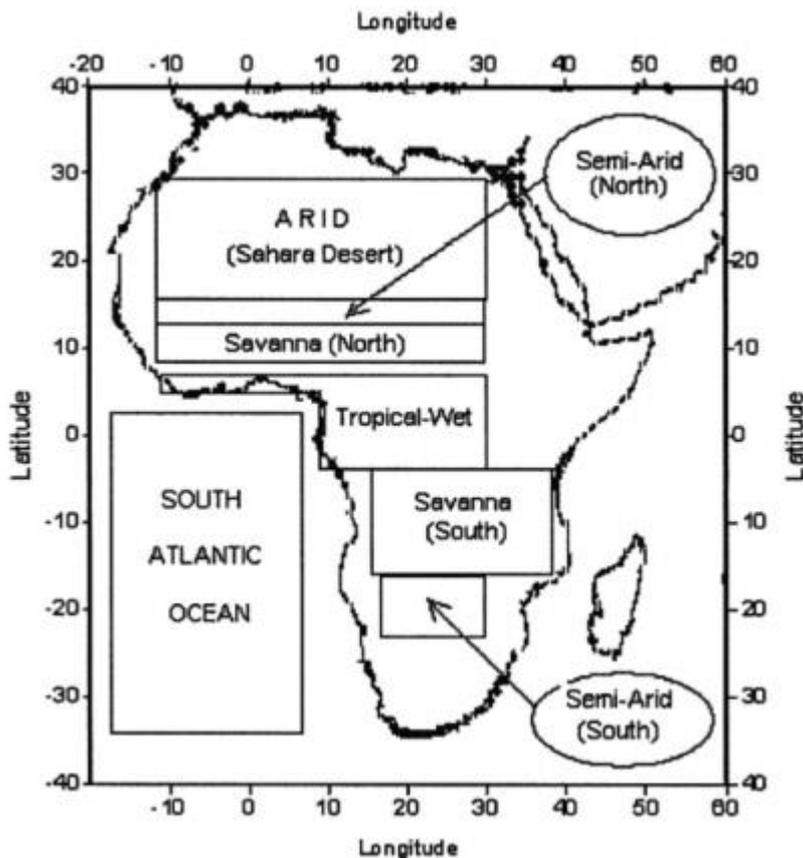


Figure 10 : les principales zones climatiques Africaines [15]

Ces résultats sont d'une importance capitale pour l'étude de la diffusion en bande Ka, du fait de la sensibilité élevée de cette bande de fréquences aux atténuations atmosphériques, et aux nombreux autres facteurs responsables de la dégradation et de l'absorption du signal dans cette bande de fréquences.

8.2. Caractéristiques du spectre pour les accès hertziens

L'UIT définit les caractéristiques du spectre radio fréquentiel pour les accès hertziens, pour les différentes bandes de fréquences attribuées aux services fixes et mobiles par satellite [16]. Ainsi, pour les fréquences comprises entre 10 et 30 GHz :

- 41 • Leur exploitation se fait pour des services tels que la téléphonie ; la transmission de données à faible, moyen et grand débit ainsi que la vidéo.

- La propagation dans ces bandes de fréquences : nécessite une visibilité directe entre l'émetteur et le récepteur, la prise en compte de l'affaiblissement du signal du à la pluie ; cette propagation peut se faire en zones urbaines et suburbaines.
- La taille des antennes dans ces bandes de fréquences est très réduite
- Elles permettent l'utilisation des technologies point à point (P-P) et point à multipoints (P-MP).
- Les puissances d'émission dans ces bandes sont plus coûteuses à obtenir du fait de la technologie à déployer.
- Le taux de réutilisation des fréquences est très élevé, plus particulièrement pour les fréquences comprises entre 20 et 30GHz.
- Etc.

8.3. Quelques systèmes de calcul du bilan de liaison satellitaire

8.3.1. Le système « SATELLITE LINK BUDGET CALCULATOR »

- **Outils de développement** : Les outils de développement du calculateur sont principalement les langages de programmation : HTML, CSS, JavaScript.
- **Objectifs** : Il a pour objectifs de permettre pour les différents paramètres entrés par l'utilisateur au clavier, de fournir des résultats sur la liaison concernée.
- **Résultats** : Les paramètres de sortie (résultats sur la liaison) sont calculés de manière globale après que l'utilisateur ait rentré tous les paramètres de calcul nécessaires et affichés dans les cases correspondantes simultanément.
- **Limites de l'outil** :
 - Le calculateur est '**online**' et les calculs ne peuvent s'effectuer que moyennant une connexion à internet de l'utilisateur.
 - Le calculateur n'intègre pas tous les paramètres nécessaires à l'établissement d'un bilan de liaison d'un bout à l'autre de la liaison donc ne fournit que de façon partielle des informations sur le bilan de la liaison.
 - Les résultats des calculs sur la liaison ne peuvent pas être sauvegardés pour des utilisations ultérieures.

8.3.1.1. - Interface graphique

Ce système de calcul du bilan de liaison satellitaire se présente sous forme de formulaire possédant des cases pour les paramètres à rentrer et à calculer. Le formulaire possède trois couleurs indicatives, dont le bleu indique le paramètre qui sera fourni en sortie moyennant les valeurs de certains paramètres en entrée. Les différents paramètres sont subdivisés en deux groupes : les paramètres d'entrée symbolisés par les cadres blancs et les paramètres de sortie symbolisés par les cadres verts.

1.calculation of uplink path loss		
Uplink frequency GHz		
Range (35778 - 41679) km	37000	
Uplink path loss dB		
2.calculation of transmitting antenna gain		
Uplink antenna diameter m		
Uplink antenna aperture efficiency e.g. 0.65		
Uplink antenna transmit gain dBi		
3.calculation of transmit EIRP & operating flux density		
Transmit power per carrier(W)		
Transmitter feeder losses(dB)		
Antenna pointing loss		
No of carriers		
Amplifier back off		
Transmit EIRP dBW		
Uplink pfd at satellite dBW/m ²		
Power rating of ground transmitter		
4.Calculation of uplink to noise ratio		
Up link rain attenuation		
Satellite uplink G/T dB/K		
Uplink C/N dB		

Figure 11 : aperçu de l'interface utilisateur de l'outil de calcul « Satellite link budget calculator »

8.3.2. Le système « Satcoms UK- calculateur de bilan de liaison »

- **Outils de développement** : Les outils de développement du calculateur sont principalement les langages de programmation : HTML, CSS, JavaScript.
- **Objectifs** : Le calculateur permet pour les utilisateurs mieux outillés et ceux moins outillés (débutants) dans le domaine, de fournir des résultats sur la liaison concernée.

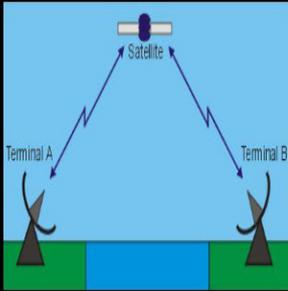
- **Résultats** : Les paramètres de sortie (résultats sur la liaison) sont calculés de manière globale après que l'utilisateur ait rentré tous les paramètres de calcul nécessaires et affichés dans les cases correspondantes simultanément.
- **Limites de l'outil** :
 - Le calculateur est 'online' et les calculs ne peuvent se faire que moyennant une connexion à internet par l'utilisateur.
 - Le calculateur n'intègre pas certains paramètres nécessaires à l'établissement d'un bilan de liaison global.

3.3.2.1 - Interface graphique

NOTE: These Link Budget values and results can be 'Saved' and 'Loaded' for use next time:

Load Link Budgets Save Link Budgets Clear Link Budgets

Terminal A		Satellite		Terminal B	
Uplink Frequency	<input type="text"/> (GHz)	Satellite G/T	0 (dB/K)	Downlink frequency	<input type="text"/> (GHz)
Tx Antenna diameter	<input type="text"/> (m)	Satellite EIRP	36 (dBW)	Rx Antenna diameter	<input type="text"/> (m)
Tx Antenna Efficiency	0.6	Satellite Range	38784.9 (km)	Rx Antenna Efficiency	0.6
Tx forward power	<input type="text"/> (dBW)	Satellite PFD	<input type="text"/> (dBW/m ²)	System RX noise Temp.	21 (dBK)
Tx Bandwidth	<input type="text"/> (KHz)	Uplink C/N	<input type="text"/> (dB/Hz)	Weather Margin	3 (dB)
TX Antenna gain	<input type="text"/> (dBi)	Downlink C/N	<input type="text"/> (dB/Hz)	RX Antenna gain	<input type="text"/> (dBi)
Tx EIRP	<input type="text"/> (dBW)			RX Antenna G/T	<input type="text"/> (dB/K)
Uplink path loss	<input type="text"/> (dB)			Downlink path loss	<input type="text"/> (dB)
Uplink C/N	<input type="text"/> (dB/Hz)			Downlink C/N	<input type="text"/> (dB/Hz)



Calculate Reset

Figure 12 : Interface graphique calculateur « Satcom UK – calculateur de bilan de liaison » - utilisateurs non évolués

NOTE: These Link Budget values and results can be 'Saved' and 'Loaded' for use next time:

Terminal A			Satellite			Terminal B		
Parameter	Value		Parameter	Value		Parameter	Value	
Tx Freq	<input type="text" value="10.45"/>	GHz	Transl Freq	<input type="text" value="700"/>	MHz	Rx Freq	<input type="text"/>	GHz
EIRP	<input type="text" value="45"/>	dBm	EIRP	<input type="text" value="31"/>	dBm	C/No	<input type="text"/>	dB/Hz
G/T	<input type="text" value="15"/>	dB/K	G/T	<input type="text" value="-10.45"/>	dB/K	G/T	<input type="text" value="22"/>	dB/K
Lat	<input type="text" value="52"/>	deg	C/No Sat	<input type="text"/>	dB/Hz	Lat	<input type="text" value="42"/>	deg
Long	<input type="text" value="348"/>	deg	Long	<input type="text" value="359"/>	deg	Long	<input type="text" value="358"/>	deg
Elevation	<input type="text"/>	deg	Ant Gain	<input type="text" value="17.3"/>	dBi	Elevation	<input type="text"/>	deg
Azimuth	<input type="text"/>	deg	Transp Gain	<input type="text" value="142.6"/>	dB	Azimuth	<input type="text"/>	deg
Path Loss	<input type="text"/>	dB	Req'd EIRP	<input type="text"/>	dBm	Path Loss	<input type="text"/>	dB
Losses	<input type="text" value="2"/>	dB	% EIRP	<input type="text"/>	%	Losses	<input type="text" value="2"/>	dB
Margin	<input type="text" value="3"/>	dB	Pwr @ Sat	<input type="text"/>	dBW	Margin	<input type="text" value="3"/>	dB
			Modem					
			Data Rate	<input type="text" value="64000"/>				
			Eb/No Req'd	<input type="text" value="6"/>				
			Status	<input type="text" value="UNLOCKED"/>				
			Link Margin	<input type="text"/>				

Figure 13 : interface d'interaction avec l'utilisateur du « Satcom UK -Calculateur de bilan de liaison »- utilisateurs évolués

Le calculateur possède deux grandes parties : une pour des calculs de simple envergure, destinée aux utilisateurs désireux d'effectuer de simples calculs sur une liaison, et une deuxième, pour des calculs de niveau plus élevé, destinée aux utilisateurs plus avancés dans le domaine.

Chapitre deux

2016

ANALYSE, CONCEPTION ET MODELISATION DU SYSTEME

Le chapitre suivant présente les différentes étapes de la conception et la réalisation du système pouvant répondre à l'objet de notre problématique.

1. METHODOLOGIE GENERALE

2016

1.1. Diagramme de la méthode

Notre approche méthodologique suit le schéma conceptuel suivant :

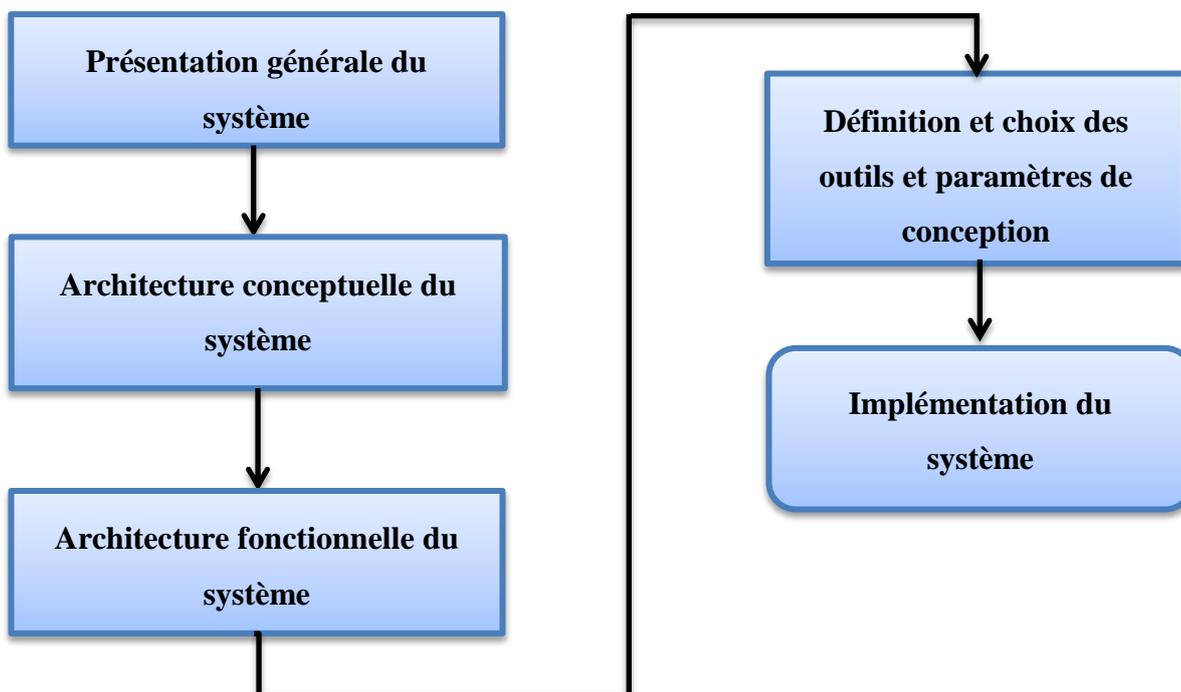


Figure 14 : Diagramme de la méthode de conception du calculateur

1.2. Présentation générale du système

Le système que nous allons concevoir est un calculateur de bilan de liaison satellitaire, c'est-à-dire un système permettant à un utilisateur agréé d'évaluer, pour une liaison satellitaire donnée, les différents paramètres intervenants dans son bilan de liaison satellitaire et de ce fait, d'évaluer la qualité de la liaison exploitée en tout temps ; par ailleurs, la

possibilité sera donnée aux utilisateurs de sauvegarder les résultats des calculs ainsi effectués pour consultation ultérieure.

1.2.1. Besoins fonctionnels

2016

Pour assurer le bon fonctionnement du calculateur et la réalisation de son objectif, il est nécessaire que ce dernier possède les fonctionnalités suivantes :

- Permettre à l'utilisateur de savoir de façon exacte quels sont les paramètres que ce dernier peut choisir d'évaluer sur la liaison,
- Permettre à l'utilisateur d'effectuer les différents calculs sur le segment choisi,
- Fournir à l'utilisateur des formulaires lui permettant de rentrer les paramètres de liaison et lui afficher les valeurs des paramètres calculés.
- Fournir à l'utilisateur la possibilité de sauvegarder les résultats des calculs effectués sur la liaison, de les visualiser, de les supprimer.

1.2.2. Besoins non fonctionnels

Pour une harmonisation et une utilisation plus générale de l'outil, nous comptons :

- Proposer à l'utilisateur une page lui permettant d'avoir des connaissances générales sur les principales bandes de fréquences employées pour les services de radiodiffusion par satellite, notamment la bande C, la bande Ku et la bande Ka,
- Proposer à l'utilisateur une page lui donnant accès à quelques recommandations de l'ITU sur la radiodiffusion par satellite.

1.3. Architecture Conceptuelle et modélisation du système

Le calculateur mis sur pied doit pouvoir satisfaire aux conditions ci-après :

- La saisie et récupération des données,
- 48 • La mémorisation de ces données à l'aide des bases de données,
- Le traitement des données reçues afin d'évaluer les différents paramètres de la liaison,
- La restitution des résultats de calcul après traitement.

Pour ce faire, notre choix de modélisation du système est la modélisation suivant MERISE, qui est une méthode d'analyse et de conception des systèmes d'informations sur le principe de la séparation des données et des traitements.

2016

La conception de notre application repose sur le modèle architectural MVC (Modèle-Vue-Contrôleur).

L'architecture Modèle-Vue-Contrôleur est une manière d'organiser l'interface graphique d'un programme. Le MVC permet notamment de séparer une application en 3 couches :

- La couche Modèle
- La couche Vue
- La couche Contrôleur

a) La couche Modèle

La couche Modèle représente la partie de l'application qui exécute la logique métier. Elle gère les données, notamment l'accès et la mise à jour, mais garantit également leur intégrité. Elle est responsable de récupérer les données de les convertir à travers le traitement des données, la validation, l'association de données. Cette couche est la couche principale d'interaction avec les bases de données utilisées dans la conception de l'application.

b) La couche Vue

La couche Vue retourne une représentation des données venant du Modèle. Elle est responsable de l'utilisation des informations dont elle dispose pour produire une interface de présentation de l'application. Elle utilise les données du Modèle pour fournir une page HTML contenant ces données. Elle reçoit par ailleurs toutes les actions de l'utilisateur (sélection de données, boutons...), qu'elle envoie ensuite au Contrôleur.

49

c) La couche Contrôleur

La couche Contrôleur gère les requêtes des utilisateurs. Elle est responsable de retourner une réponse avec l'aide des couches Modèle et Vue. Le Contrôleur attend les requêtes des clients, vérifie leur validité selon les règles d'autorisation, délègue les données récupérées et traitées par le Modèle, et sélectionne les types de présentation correctes que le client accepte, pour permettre à la couche Vue d'afficher le résultat. Plus précisément, il reçoit tous les évènements de l'utilisateur et enclenche les actions à effectuer.

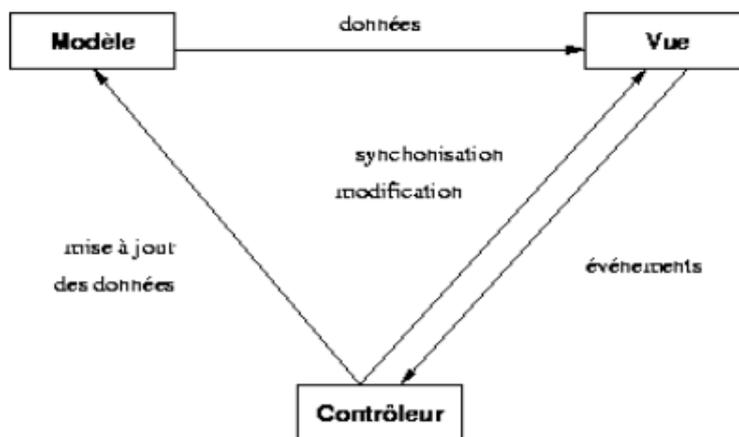


Figure 15 : Interaction entre le Modèle, la Vue et le Contrôleur [16]

Le traitement d'une demande d'un client se déroule selon les étapes suivantes :

1. Le client fait une demande au Contrôleur. Le contrôleur voit passer toutes les demandes des clients.
2. Le contrôleur traite cette demande (il peut solliciter pour ce faire l'aide de la couche Modèle).
3. Une fois la demande du client traitée, le contrôleur reçoit la réponse de la couche Vue.
4. Le contrôleur choisit ensuite la réponse à envoyer au client (la vue)
5. La vue est ensuite envoyée au client.

50

Une représentation plus explicite de ce processus est donnée par le schéma suivant :

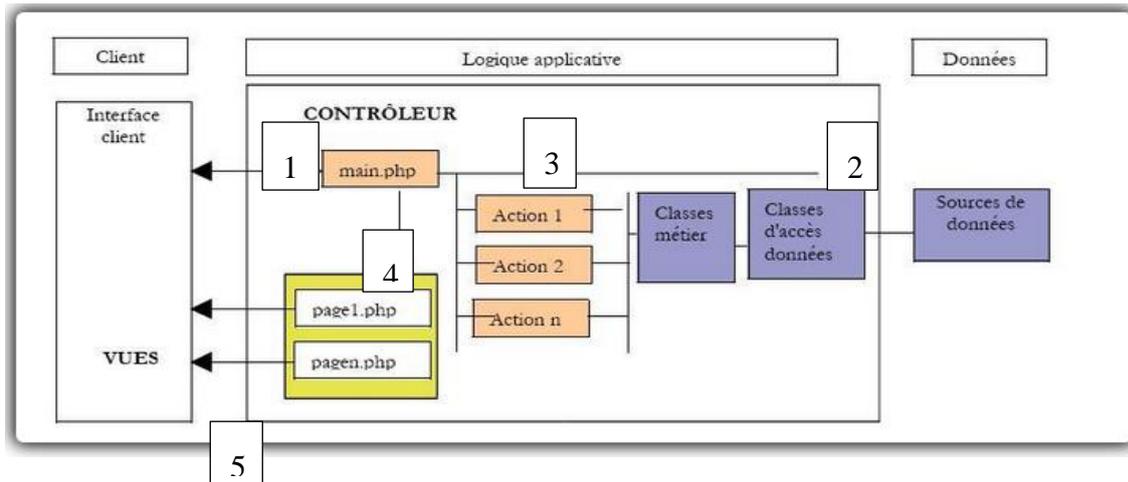


Figure 16 : Processus de traitement d'une demande client [16]

1.3.1. Architecture client/serveur

L'architecture conceptuelle de notre application est une architecture client/serveur à deux niveaux. L'architecture à deux niveaux ou architecture 2-tier, caractérise les systèmes clients/serveurs pour lesquels le client demande une ressource et le serveur la lui fournit directement, en utilisant ses propres ressources. Le serveur ne fait pas appel à une autre application afin de fournir une partie du service.

Avantage : Ne nécessite que l'intervention de deux entités et le client peut recevoir des réponses directement du serveur sans engager une connexion à la source de données.

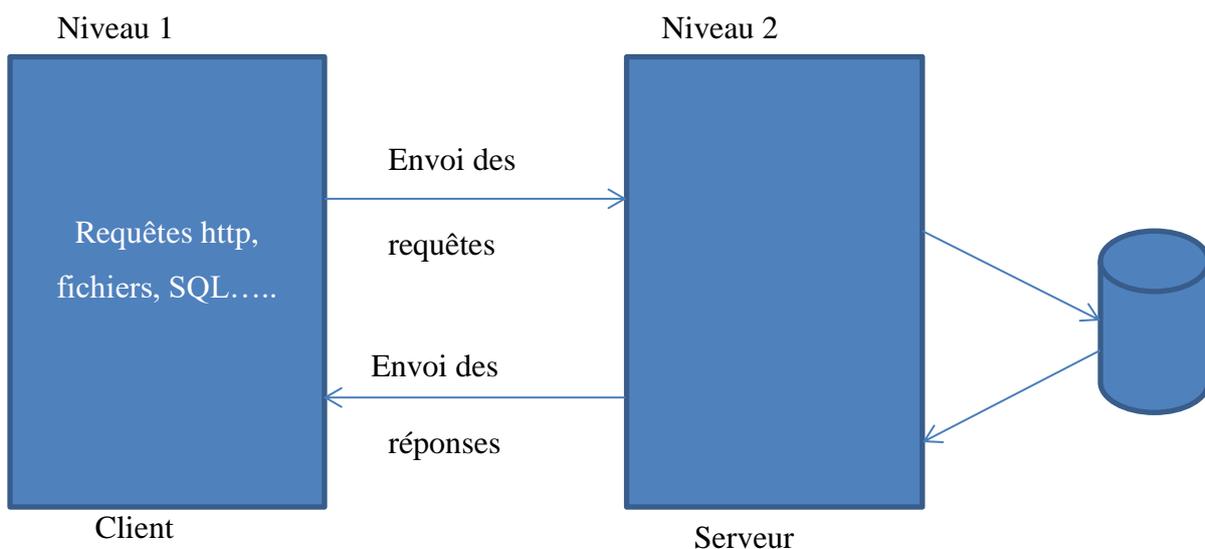
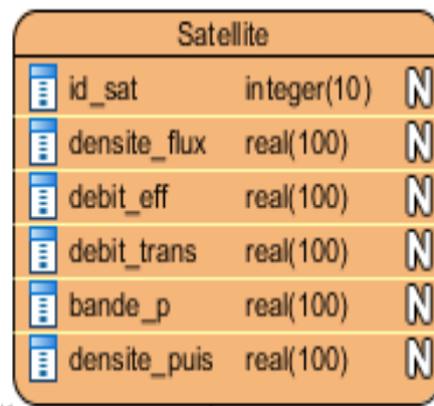


Figure 17 : Schéma de l'architecture client/serveur 2-tier

1.3.2. Définition des classes d'entités

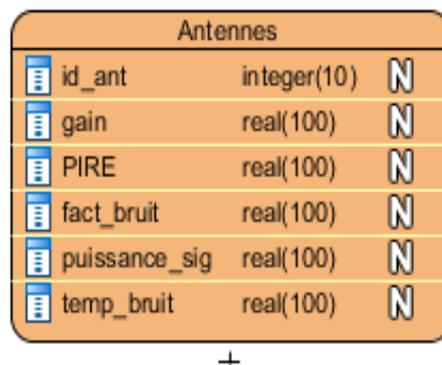
Les différentes classes intervenants dans notre système sont les classes : antennes, satellite, station , terminal et liaisons satellitaires. Les principales classes d'entités sont les suivantes :

- La classe satellite :



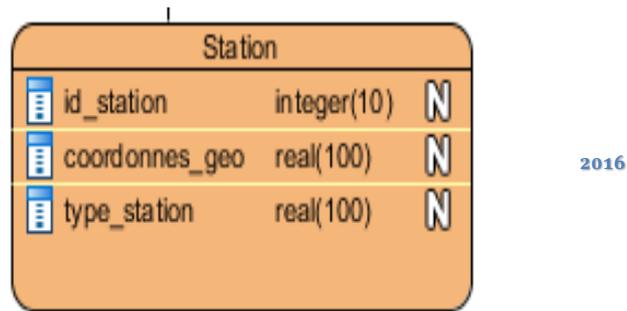
Elle définit entièrement le satellite et ses différents paramètres.

- La classe antennes :



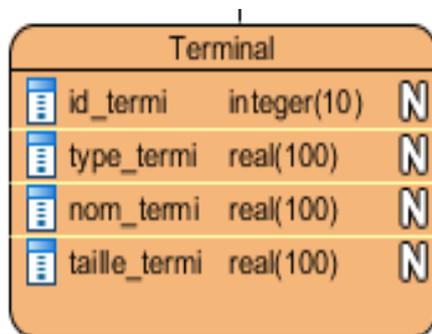
Elles caractérise les antennes des stations au sol et en définit les différents paramètres.

- La classe station :



Elle caractérise les différentes stations, émettrice et réceptrice.

- La classe terminal :



1.3.3. Modèle conceptuel de données

Le modèle conceptuel de données du calculateur contient les quatre tables présentées plus haut tel qu'il suit :

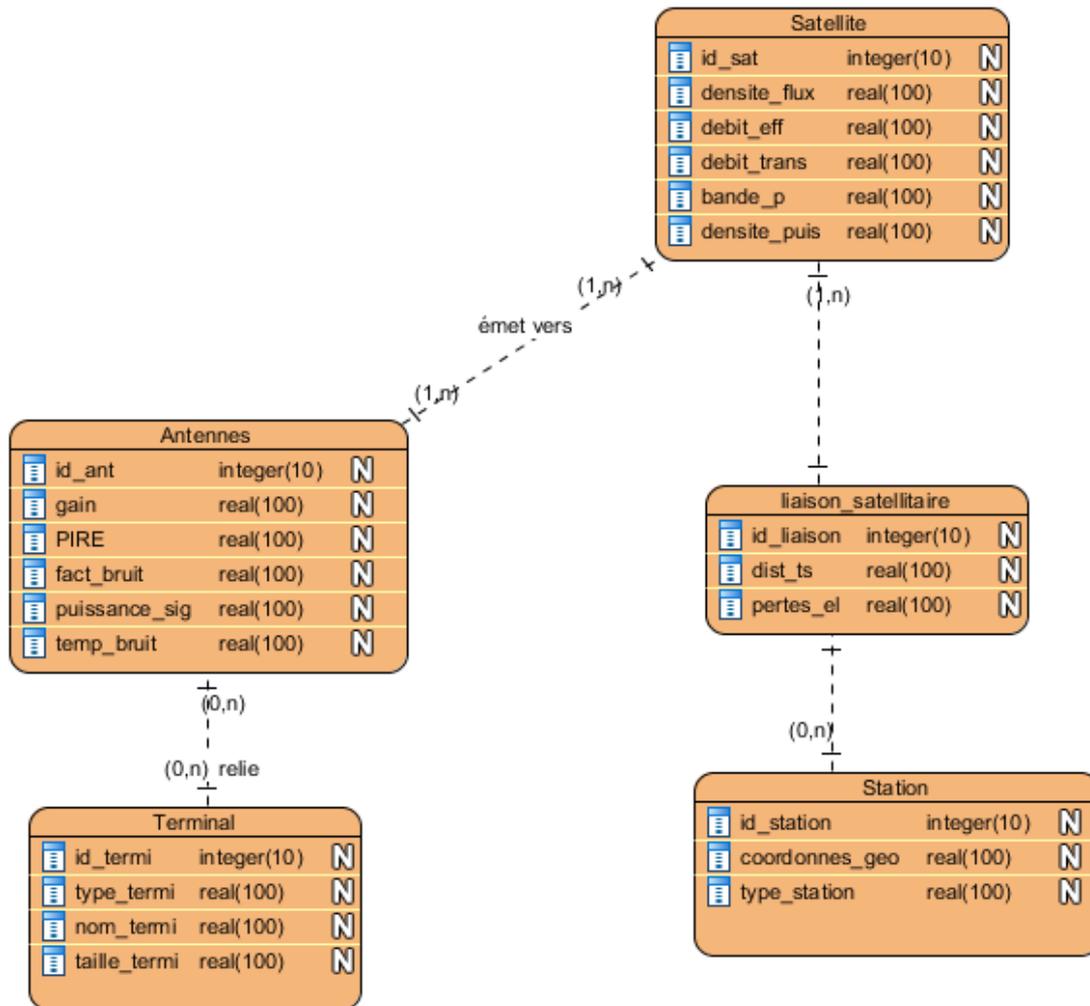


Figure 18 : Modèle conceptuel de données du calculateur

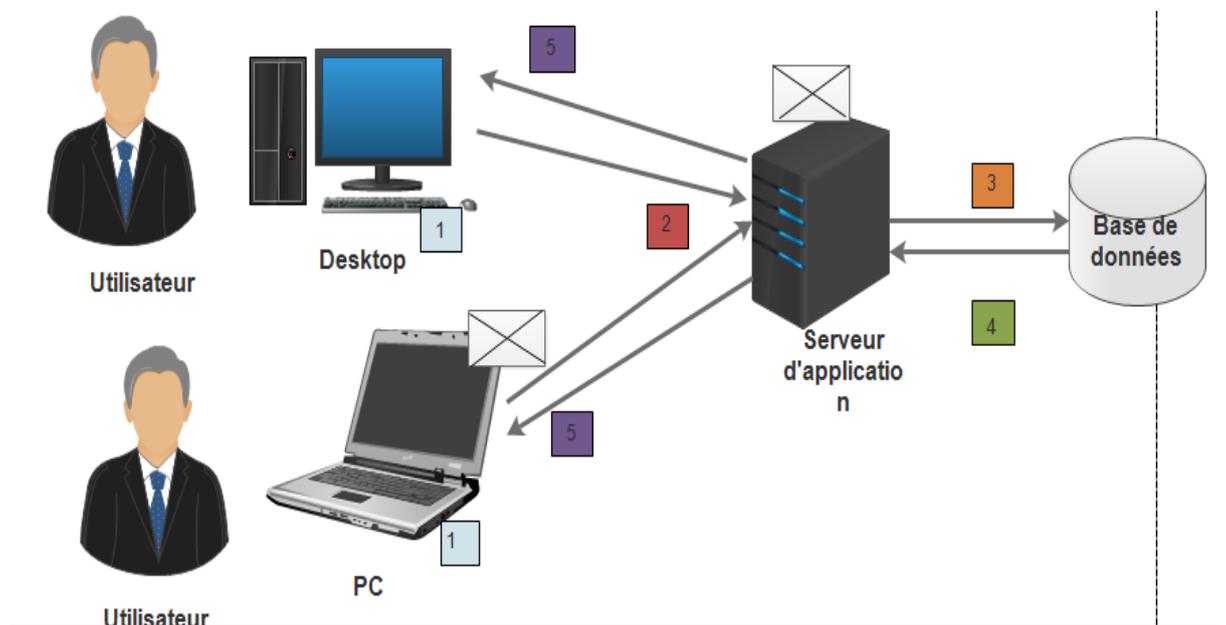
Le système gère les différents éléments constitutifs du bilan de liaison en termes d'éléments matériels. Il s'agit principalement de tous les équipements de liaison, ainsi que des différentes stations dans lesquelles ces derniers se trouvent, et aussi des terminaux pouvant être reliés à ces stations.

1.4. Architecture fonctionnelle du système

Un calculateur de bilan de liaison, a pour finalité principale de donner, pour un certain nombre de paramètres, l'état de la liaison étudiée à un moment donné. L'obtention des résultats à travers le calculateur doit suivre un processus bien défini, partant de la donnée des paramètres par l'utilisateur, à l'affichage des résultats caractéristiques de la liaison. De ce fait, il doit pouvoir intégrer des fonctions de communication entre l'utilisateur et la machine ou l'interface de calcul dudit calculateur, des fonctions de calcul permettant d'effectuer avec fiabilité les calculs sollicités par l'utilisateur et de restituer de manière fidèle les résultats obtenus par calcul.

Toutefois, il est nécessaire pour l'utilisateur d'avoir au préalable initié une session de calcul lui autorisant l'accès au calculateur, à travers une communication entre l'utilisateur, le serveur d'application dans lequel est déployée le calculateur et la base de données contenant les informations sur les comptes des utilisateurs.

Ce processus est schématisé comme suit :



55

1. L'utilisateur à partir de son poste de travail (desktop ou laptop) se connecte à l'application en entrant son login et son mot de passe.

2. Il envoie une requête au serveur d'application pour demander une session de travail (lancement de l'application)
3. Le serveur d'application consulte la base de données pour se rassurer que l'utilisateur possède un compte lui donnant accès à l'application.
4. Si l'utilisateur possède déjà un compte dans la base de données, une réponse est envoyée au serveur d'application.
5. Le serveur d'application autorise alors l'accès à l'utilisateur qui a donc la possibilité d'effectuer des calculs sur la liaison et de les enregistrer sur son ordinateur.

1.5. Définition des outils et paramètres d'implémentation

1.5.1. Choix des outils d'implémentation

Le choix des outils de conception repose sur les caractéristiques principales du système à mettre sur pied ou à réaliser. Dans le cadre de notre travail portant sur un calculateur de bilan de liaison satellitaire, notre choix s'est porté sur les outils classés dans le tableau suivant :

Le tableau suivant présente une étude comparative de quelques langages de programmation Web.

a) Comparaison des langages de programmation

Notre étude comparative se portera sur les langages Java et PHP. Toutefois, il existe plusieurs langages possibles d'utiliser pour le développement des applications web.

Tableau 7 : Tableau comparatif langages de programmation Java et PHP

Critère	JAVA	PHP
---------	------	-----

Paradigme	Orientée objet, structurée, impérative	Impératif, objet, fonctionnel, procédural, réflexif. Langage interprété
Typage	Statique, fort, sûr, nominatif	Dynamique, faible
Version	8	5.5.11
Compatibilité ascendante	OUI	Pas toujours
Multiplateforme	OUI	OUI
Type d'application cible	Toutes	WEB
Slogan	Write once, run anywhere (WORA)	PHP is a general-purpose scripting language that is especially suited to web development
Pré-requis	Une JVM	Un interpréteur PHP et un serveur web (Souvent Apache)
Lourdeur de mise en place	Moyen	Faible
Environnement de développement	Eclipse, NetBeans, JDeveloper	Simple éditeur de texte, ou IDE intégré

Dans l'optique de concevoir une application web dynamique et évolutive, et pour sa simplicité d'utilisation, notre choix de langage va se porter sur le langage PHP, notamment le PHP 5, pour la programmation de notre application.

b) Comparaison des frameworks Java et PHP

Dans l'optique de structurer et faciliter le développement d'applications, l'utilisation des frameworks est nécessaire. Un framework ou structure ²⁰¹⁶logicielle est un ensemble de composants logiciels structurels, qui sert à créer les fondations ainsi que les grandes lignes de tout ou d'une partie d'un logiciel ou d'une application.

Tableau 8 : Tableau comparatif des frameworks Java et PHP

Critère	JAVA JEE (ou SPRING)	PHP seul (sans framework)	PHP ZEND ou Symfony
Réaliser une application web	OUI	OUI	OUI
Compatibilité ascendante	OUI	OUI (sans changement de version majeure)	OUI (sans changement de version majeure)
Nécessité d'un serveur d'application autre qu'un serveur WEB	OUI	NON	NON
Supporté par un éditeur principal	OUI (Oracle société privée mais responsable du langage JAVA)	OUI	NON
Version	7/4.0.5	5.5	2.3.1/2.4.4

D'après le tableau précédent, le langage PHP avec ou sans framework ne nécessite aucun autre serveur qu'un serveur web et permet tout comme le Java de réaliser une application web. Notre choix se porte donc vers un framework PHP pour la réalisation de notre application.

c) Comparaison des frameworks PHP

Il existe plusieurs frameworks PHP dont les principaux sont : Zend, Symfony, CodeIgniter, Yii, CakePHP. La figure ci-dessous représente une étude comparative de ces différents frameworks.



Figure 19 : Comparaison des frameworks PHP [17]

D'après ce graphique, nous constatons que le CodeIgniter, en jaune, est un framework auquel les utilisateurs s'intéressent d'année en années. Il se révèle donc être un excellent cadre de développement d'application web.

59

d) L'outil Bootstrap

Bootstrap est une collection d'outils utiles à la création de sites et d'applications web. C'est un ensemble qui contient des codes HTML et CSS, des formulaires, des boutons, outils de navigation et autres éléments interactifs, ainsi que des extensions JavaScript. Il permet aux projets développés de s'adapter dynamiquement au format des supports sur lesquels ils sont consultés (PC, tablettes, smartphones).

- **Fonctionnement** : il consiste en une série de feuilles de styles LESS qui implémentent différents composants. Les développeurs peuvent alors sélectionner les composants dont ils ont besoin en modifiant cette feuille principale.
- **Outil fournis** : le framework fournit une feuille de style CSS qui contient des définitions de base pour tous les composants HTML, ce qui permet de disposer d'une apparence unique pour les textes, tableaux et autres éléments de formulaires. Il fournit également des éléments graphiques tels que les boutons, icônes, barres de progression, des composants sous forme de plugins utilisant la bibliothèque JQuery pour l'addition de nouvelles fonctionnalités.

Tableau 9 : Outils d'implémentation du calculateur

Outils d'implémentation du calculateur	
Langages de programmation :	<ul style="list-style-type: none"> - HTML 5 : Programmation des pages web de l'application - CSS 3 : Définition des feuilles de style et design des pages web - JavaScript : Ecriture des différentes fonctions de calcul des paramètres de liaison - Ajax : Ecriture des requêtes pour générer les rapports PDF
Serveur d'application	<ul style="list-style-type: none"> - WampServer 2.5 : Serveur local pour l'installation et le déploiement de l'application web conçue.

60

Environnement de programmation

- **CodeIgniter : Développement de l'application web**
- **Bootstrap : Rendre dynamiques les pages web de l'application**

Navigateur Web

- **Mozilla Firefox 46.0.1.5966 : Gestion des interactions Utilisateurs - Application**

1.5.2. Paramètres d'implémentation du calculateur

Le bilan de liaison satellitaire s'établit sur la base de l'évaluation de certains paramètres appelés paramètres de liaison. Ils se définissent sur l'ensemble de la liaison partant de la station émettrice à la station réceptrice en passant par le satellite.

Ces paramètres peuvent être différents selon qu'il s'agit de la liaison montante ou de la liaison descendante. Mais aussi, la position géographique des sites où sont situées les différentes stations (émettrice et réceptrice), peut favoriser la différence de valeur de certains paramètres, surtout ceux dont le calcul fait intervenir la position géographique du lieu ou du site d'implantation de la station.

Nous avons regroupé et classé ces différents paramètres en trois catégories, ceux évalués au niveau de la station émettrice, ceux évalués au niveau du satellite et ceux évalués au niveau de la station réceptrice.

Le schéma ci-dessous représente la corrélation entre les différents paramètres de liaison et des entités intervenant dans le processus d'établissement d'un bilan de liaison.

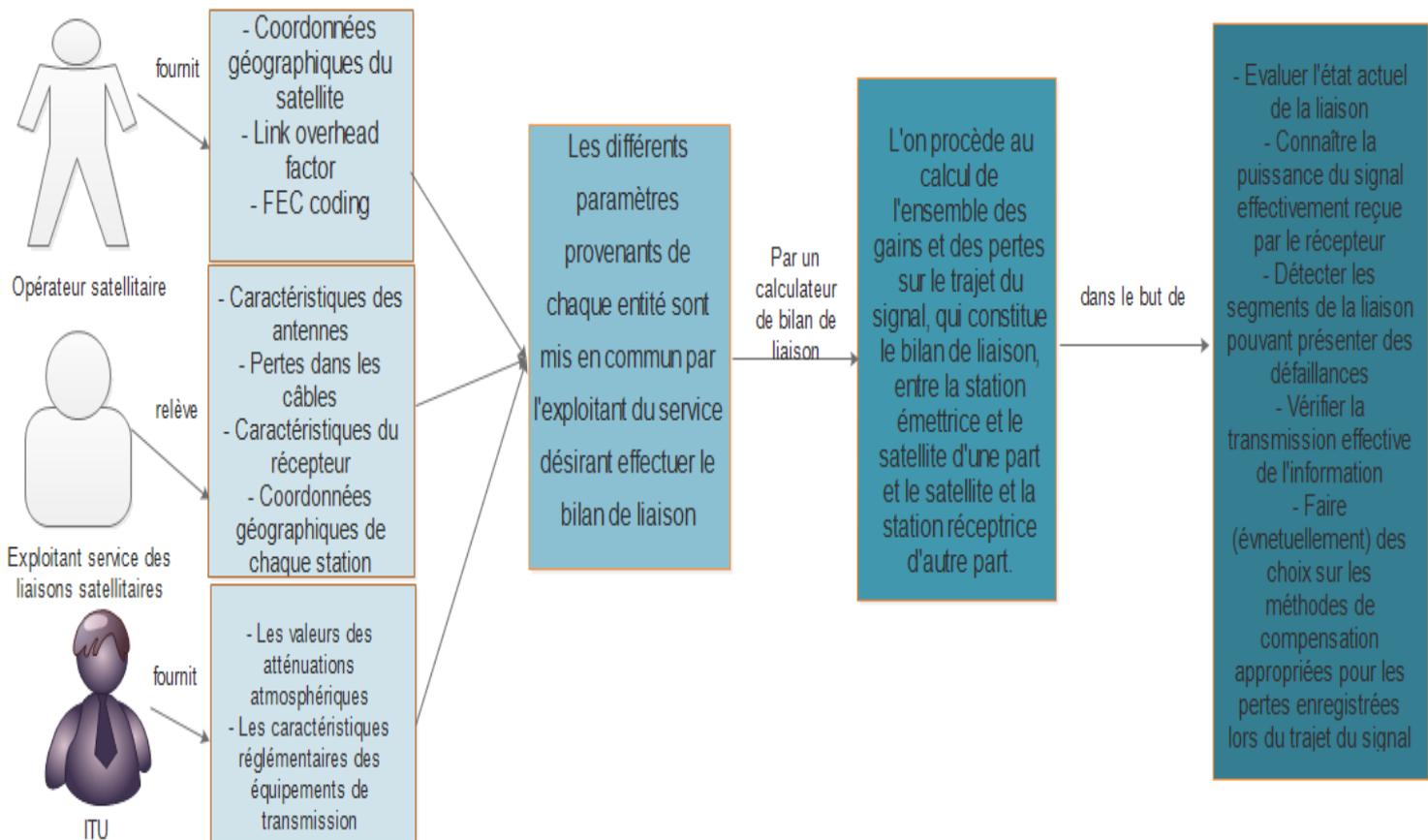


Figure 20 : Procédure de calcul d'un bilan de liaison

Dans ce schéma on distingue trois grands intervenants :

- 1) L'opérateur satellitaire dont on loue les services et qui possède les caractéristiques du satellite en orbite. Il est chargé de fournir au service des liaisons satellitaires les paramètres suivants : coordonnées géographiques du satellite, link overhead factor, FEC coding ;
- 2) L'exploitant du service des liaisons satellitaires travaillant à la station terrienne et qui possède les fiches techniques des équipements de la station terrienne. Il est chargé de relever les différentes caractéristiques des équipements de liaison et de fournir : les caractéristiques des antennes, les valeurs des pertes dans les câbles utilisés à la station terrienne, les caractéristiques des équipements récepteurs auxquels il doit aimerait faire parvenir le signal et les coordonnées géographiques de chaque station au sol (émettrice et réceptrice).

- 3) L'Union Internationale des télécommunications (ITU) qui possède les caractéristiques des accès hertziens et qui est chargée de fournir : les valeurs des atténuations atmosphériques pour chaque bande de fréquence et les caractéristiques réglementaires des équipements à employer pour les transmissions par satellite.

Après avoir obtenus tous ces différents paramètres, l'exploitant du service utilise un calculateur de bilan de liaison pour évaluer chaque paramètre de liaison sur la base des informations qu'il possède.

Il peut ensuite exploiter les résultats obtenus pour :

- Evaluer l'état actuel de la liaison,
- Déterminer la puissance du signal effectivement reçue par l'utilisateur,
- Faire des comparaisons avec des précédents résultats sur la liaison pour détecter des segments de liaison défectueux,
- Vérifier la transmission effective de l'information sur les différents liens,
- Faire (éventuellement des choix sur les méthodes de compensation appropriées pour compenser les pertes enregistrées sur le trajet du signal).

1.5.2.1. Station émettrice

La station émettrice est l'élément qui constitue le début de la chaîne de transmission de l'information. Les paramètres nécessaires à l'établissement du bilan de liaison sur le lien montant sont principalement constitués de :

- **Coordonnées géographiques de la station :**

La position géographique du site d'émission du signal joue un rôle important dans la détermination des paramètres de liaison, car elle entre dans l'évaluation de la distance entre la station et le satellite qui, à son tour, est d'une grande influence sur la propagation du signal. En effet, plus la station d'émission et le satellite sont séparés par une grande distance, plus le parcours du signal est long et plus on a de chances de rencontrer des obstacles à la propagation et de subir une atténuation du signal transmis.

Les éléments géographiques qui permettent de déterminer cette position géographique sont : la latitude, la longitude et l'altitude.

- **Latitude** : c'est une valeur angulaire, expression du positionnement nord ou sud d'un point sur Terre.
- **Longitude** : c'est une valeur angulaire, expression du positionnement est ou ouest d'un point sur Terre.
- **Altitude** : Aussi appelée élévation, c'est une grandeur qui exprime un écart entre un point donné et un niveau de référence ; par convention sur Terre, ce niveau est très souvent le niveau de la mer.

Pour obtenir la position exacte d'un point à la surface de la Terre grâce à ces coordonnées géographiques, il faut procéder à une combinaison des deux angles fournis par la latitude et la longitude. Le périmètre de la Terre qui correspond à un tour de 360° est d'environ 40 000 km et par conséquent, un degré représente environ 111.32 km [17]

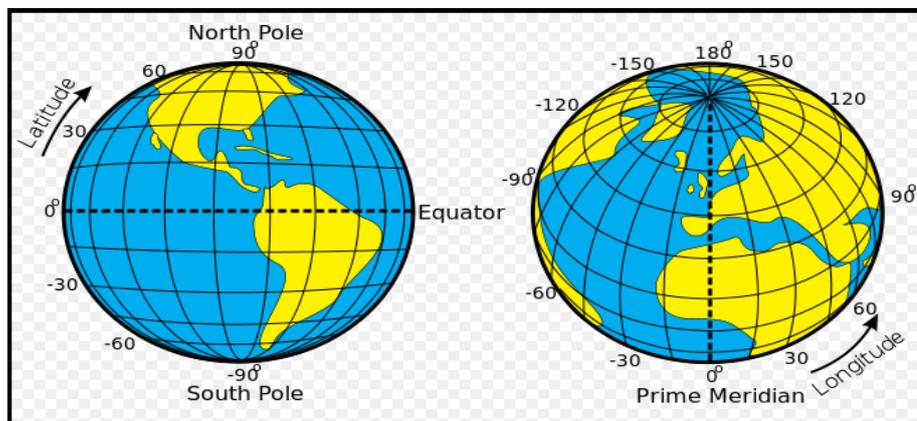


Figure 21 : Représentation de la latitude et la longitude [18]

La distance entre la station émettrice et le satellite permet d'évaluer les pertes sur la puissance du signal sur le lien montant comme le lien descendant. Elle est donnée par la formule :

64

$$d^2 = d\theta^2 + 2r(r + d\theta)(1 - \cos\lambda\cos\alpha) \quad (5)$$

Où : $d\theta$ représente l'altitude du satellite (35786 Km pour les satellites GEO) en Km

r est le rayon de la Terre (6378Kms) exprimé en Km

λ est la différence de longitude entre la station d'émission et le satellite

α est la latitude de la station au sol (émission ou réception)

d est la distance Terre-satellite exprimées en Kms

- **Caractéristiques de l'antenne d'émission :**

Les performances obtenues lors de la transmission d'un signal, sur le lien montant, dépendent largement des caractéristiques des équipements d'émission qui déterminent, entre autres, la force ou puissance du signal à transmettre, garantissant ainsi la portée de ce signal. Il devient alors évident que des équipements de haute performances produisent des signaux de puissance élevée.

L'un des équipements d'émission dont les caractéristiques influent le plus sur le signal à transmettre est l'antenne d'émission. Parmi celles-ci on peut citer :

- **L'efficacité de l'antenne (η)** : il définit le rendement de l'antenne.
 - **Le diamètre de l'antenne (D)** : c'est l'ouverture totale de l'antenne. Il permet de caractériser la surface de réception et de réflexion totale de l'antenne, ainsi que le calcul du gain de ladite antenne. Il détermine également la fraction de la puissance que cette antenne recevra (antenne réceptrice).
- 65 • **Le gain de l'antenne (G_T)** : c'est un facteur qui permet de caractériser la capacité que possède une antenne à concentrer la puissance émise par cette dernière dans une direction privilégiée.

Il est donné par la formule :

$$G_T = 10 \log \left(\frac{\pi^2 D^2 \eta}{(3/10 * f)^2} \right) \quad (6)$$

Où : D représente le diamètre de l'antenne d'émission exprimé en mètres (m)

η représente l'efficacité de l'antenne

f représente la fréquence d'émission de l'antenne exprimée en GHz

G_T est le gain de l'antenne proprement dit, exprimé en décibels (dB)

- **La PIRE de l'antenne** : c'est le produit de la puissance rayonnée par cette antenne et de son gain (formule mathématique). La puissance isotrope rayonnée équivalente mesure l'intensité du signal émis par un satellite vers la Terre, ou par une antenne sur la Terre vers un satellite. Plus la PIRE de l'émetteur est élevée, plus le rapport G/T du récepteur peut être réduit pour une même qualité de réception (donc plus l'antenne de réception peut être petite).

Elle est donnée par la formule :

$$\text{PIRE} = P_T G_T \quad (7)$$

Où : P_T est la puissance transmise à l'antenne exprimée en watts

G_T est le gain de l'antenne d'émission exprimé en dB

- **La sensibilité** : la sensibilité d'un système de réception est donnée par le facteur de qualité G/T (gain/température de bruit). Cette sensibilité dépend à la fois du gain de l'antenne de réception (qui croît avec la surface de l'antenne et la fréquence du signal reçu) et du bruit total des équipements électroniques utilisés pour cette réception (exprimé en température de bruit). Plus le G/T est élevé, plus la puissance d'émission

peut être réduite. Inversement, plus la puissance d'émission est forte, plus le G/T peut être réduit (donc plus l'antenne de réception peut être petite).

A côté de ces différents paramètres, l'influence de la fréquence à laquelle est émis le signal est d'une importance capitale car celle-ci fournit au signal des caractéristiques uniques, particulièrement la longueur d'onde du signal à transmettre et donc les caractéristiques du récepteur adapté pour recevoir ce genre de signal.

- **Pertes :**

Elles sont d'une grande influence dans l'évaluation d'un bilan de liaison car, elles représentent l'influence des facteurs extérieurs au signal sur la puissance de celui-ci. Plus elles sont élevées, plus la puissance du signal à transmettre diminue causant son atténuation. La propagation s'en trouve alors affectée.

Ces différentes pertes, en ce qui concerne le signal en émission, concernent principalement le guide d'onde à travers lequel va cheminer le signal avant d'être mis sur l'antenne, et les atténuations subies par le signal lors de son émission, dues aux différentes influences atmosphériques.

- **Les pertes dans le guide d'onde :** le guide d'onde est une sorte de conduit, un équipement permettant de guider le signal à l'antenne. Il a pour rôle principal d'acheminer le signal afin que celui-ci ne rayonne pas avant de se retrouver sur l'antenne. Il est constitué d'une matière engendrant des pertes et par conséquent, cause des pertes en puissance pour le signal à transporter.
- **Les atténuations dans l'espace :** elles sont dues aux divers phénomènes atmosphériques existants sur le trajet du signal lors de sa propagation et peuvent provenir, des nuages, de la pluie, du relief ou même du soleil. Elles prennent le nom d'atténuation car leur action a pour effet de réduire la puissance du signal à transmettre, donc de l'atténuer.

Les pertes qui sont facilement déterminables lors du trajet du signal et ne dépendent que des paramètres de la liaison sont les pertes en espace libre. Elles sont données par la formule :

$$P_L = 10 \log \left(\frac{(4\pi d)^2}{(3/10 * f)^2} \right) \quad (8)$$

Où : d est la distance Terre-satellite exprimée en Kms

f est la fréquence d'émission ou de réception de la station exprimée en GHz

P_L sont les pertes en espace libre proprement dites exprimées en décibels (dB)

1.5.2.2. Satellite

Le satellite, tout comme la station émettrice, possède une position géographique bien déterminée dans l'espace et des paramètres qui lui sont propres dans l'évaluation du bilan de liaison satellitaire. Il est, en effet, positionné à une altitude particulière, sur une trajectoire particulière, appelée orbite, préalablement définie en fonction de la mission accordée au satellite et de l'exploitation que l'opérateur satellitaire veut en faire.

Il possède en outre, des antennes, qui lui permettent de recevoir et d'émettre vers les stations au sol (ou vers d'autres satellites), dont les caractéristiques sont légèrement différentes de celles au sol, à cause des limites et contraintes que la mise en orbite du satellite impose tel que le poids limite de l'engin, et de l'espace dans lequel ce dernier sera maintenu durant toute la période de son exploitation.

La fonction principale du satellite étant la transmission ou la retransmission des signaux ou informations, l'évaluation ou le calibrage des paramètres du satellite doit pouvoir être bien fait en vue d'assurer une bonne transmission du signal ou, dans le cas de la diffusion, une bonne diffusion de celui-ci.

68 • Coordonnées du satellite :

Les satellites exploités pour les services de radiodiffusion par satellite sont, pour la plupart, géostationnaires ; ce qui leur confère d'avance une position presque déterminée. Les

paramètres de positionnement des satellites de radiodiffusion sont principalement la longitude et l'altitude du satellite. Ils permettent notamment au satellite d'éviter toute interférence avec les autres satellites en orbite.

2016

- **La longitude :** concernant le satellite, elle intervient particulièrement dans la détermination de la distance entre les stations au sol et le satellite.
- **L'altitude :** tout comme la longitude dans ce cadre sert à la détermination de la distance entre les stations au sol et le satellite. Elle offre également un renseignement sur la position orbitale du satellite.

- **Bande passante satellitaire :**

Elle définit, théoriquement parlant, la plage de transmission de l'information allouée au satellite. Pratiquement parlant, elle définit le nombre de transpondeurs ou de canaux que l'on peut distinguer au niveau du satellite pour la transmission des informations, la largeur du canal de transmission variant d'un satellite à un autre, en fonction des fonctionnalités attribuées au satellite et des services fournis par celui-ci.

De nombreux paramètres sont à prendre en compte concernant le calcul ou l'évaluation de la bande passante satellitaire, car, il s'agit de s'assurer que les informations que l'on veut transmettre, au rythme fixé par les normes relatives aux transmissions de ce type d'informations, le seront fidèlement. Il faut donc tenir compte des paramètres définissant la transmission des informations tels que le débit des informations arrivant sur les antennes de réception du satellite, du débit de transmission de ces informations par le satellite, du taux d'erreurs acceptable et accepté sur ces informations etc.

- **Link overhead factor :** il représente le délai de transmission, en terme de largeur du lien, entre les différents bits du message afin d'éviter toute collision ou interférence inter-symbole entre les bits du message transmis ou à transmettre.
- **Débit d'informations (DI) :** il représente de signaux de messages par seconde, le nombre de bits d'informations arrivant au satellite par seconde.

- **Débit d'informations effectif (DIE):** le débit des informations envoyées au satellite peut suite à certaines erreurs de transmission des bits d'information, être différent de celui effectivement présent au niveau du satellite.

2016

Il est donné par la formule :

$$\text{DIE} = \text{DI} / (1 + \text{Link over head factor}/100) \quad (9)$$

- **FEC coding :** c'est une technique de correction d'erreur qui permet au récepteur de détecter et de corriger les erreurs dans la transmission, sans avoir à informer l'émetteur de la présence de ces erreurs.
- **Débit de transmission de l'information (DT) :** il dépend du débit d'information et représente la vitesse à laquelle les informations sont envoyées par le satellite vers les stations réceptrices, moyennant au préalable la correction des erreurs détectées dans le signal à transmettre. D'où son expression fonction du débit d'informations et du FEC coding.

Il est donné par la formule :

$$\text{DT} = \text{DI} / \text{FEC coding} \quad (10)$$

- **Nombre de bits par symbole :** représente le nombre de symboles présents dans un bit d'information. On parle ici en symboles car pour une transmission les bits se trouvent quelque peu déformés et un symbole n'équivaut pas forcément à un bit et peut contenir plusieurs bits suivant le type de modulation. Par exemple, pour une modulation QPSK, on a deux symboles par bit d'information, un en phase et un en quadrature de phase.
- **Densité de flux de puissance du satellite (SOFD : Satellite Operating Flux Density) :** c'est la puissance reçue sur les antennes du satellite, par unité de surface.

70

Elle est donnée par la formule :

$$\text{S.O.F.D} = [\text{PIRE}]_u - [\text{pertes dues à la pluie}]_u - 162.2 \text{ (dB/Sq m)} \quad (11)$$

- **Bande passante satellitaire (Bp):** pour diffuser des données, les stations Terrestres accèdent aux satellites par l'intermédiaire de fréquences spécifiques. En effet, l'acquisition d'un support de transmission satellite est en fait la location d'une bande de fréquences qui sera consacrée et partagée par les différentes stations de ce réseau satellite.

Elle est donnée par la formule :

$$B_P = (\text{Débit de transmission} / \text{Nombre de bits par symbole}) * 1.4 \quad (12)$$

1.5.2.3. Station réceptrice

La station réceptrice, en dehors de ses coordonnées géographiques qui permettent d'évaluer la distance entre le satellite et la Terre (la station d'émission et la station réceptrice n'étant toujours pas situées au même endroit), est également caractérisée par le gain de l'antenne réceptrice, mais aussi la puissance du signal reçu au niveau de l'antenne, la puissance reçue effectivement par l'utilisateur, les pertes en espace libre en réception, la température de bruit du système de réception, la puissance de bruit du récepteur et le rapport signal/bruit en réception.

- **Puissance du signal reçu au niveau de l'antenne :** c'est la puissance du signal effectivement reçue du satellite. Elle représente le niveau en watts ou en dBwatts du signal arrivant sur l'antenne de réception de la station réceptrice, et dépend de la puissance du signal émis par le satellite en direction de la Terre, la PIRE, du gain de l'antenne réceptrice et des atténuations subies par le signal lors de son trajet du satellite vers la Terre.

- **Puissance du signal reçu par l'utilisateur :** à son arrivée au niveau de l'antenne réceptrice, le signal doit encore être transporté au moyen de câbles, vers le poste de l'utilisateur. Selon le type de câbles employés, l'on aura une différence entre le signal au niveau de l'antenne de réception et celui arrivant au poste de l'utilisateur.
- **Pertes en espace libre :** elles sont dues aux atténuations que le signal subit lors de son trajet entre le satellite et la station au sol, et proviennent principalement de l'atténuation du signal dans le vide et de l'absorption atmosphérique du signal par les nuages, le soleil, la pluie.
- **La température de bruit du système :** les éléments constitutifs du système d'antenne à la réception peuvent engendrer une élévation de température dans celui-ci, qui est la résultante de la température de bruit de l'antenne, le bruit du à la pluie et la température de bruit du LNA (Low Noise Amplifier).
- **Puissance de bruit du récepteur :** c'est le niveau de puissance total du au bruit résultant des composants électroniques à l'intérieur des éléments constitutifs du système de réception.
- **Le rapport signal/bruit du récepteur :** c'est un élément fondamental dans l'évaluation de la qualité de la liaison. Il permet de mesurer le niveau de puissance du signal par rapport au niveau de puissance du bruit dans le système. Cette valeur donne une indication sur la qualité (bonne ou mauvaise) du signal reçu par l'utilisateur.

Chapitre trois

2016

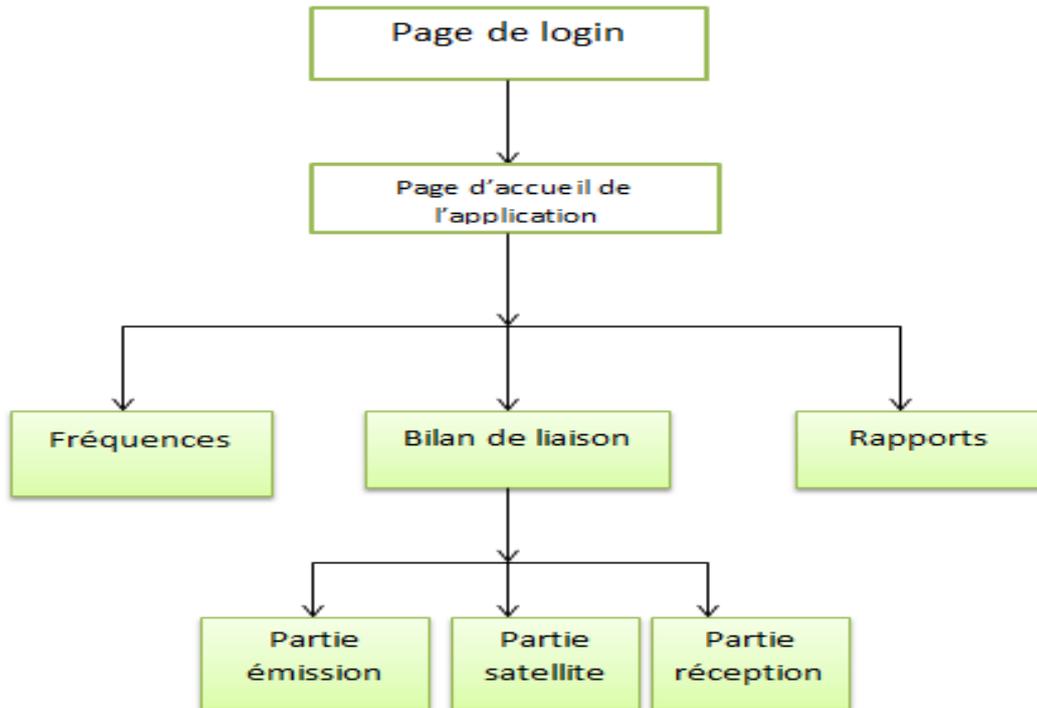
RESULTATS ET COMMENTAIRES

Le but de ce chapitre est de présenter les résultats de l'implémentation de notre application et leur interprétation pour l'utilisation des bandes de fréquences.

1. RESULTATS DE L'IMPLEMENTATION

1.1. Architecture structurelle de l'application²⁰¹⁶

L'architecture structurelle de l'application est la suivante :



On y retrouve :

- Une page de login
- Une page d'accueil principale de l'application
- Trois pages secondaires : fréquences, bilan de liaison et rapport
- Et au dernier niveau, les pages de calcul du bilan de liaison proprement dites.

1.2. Page de Login

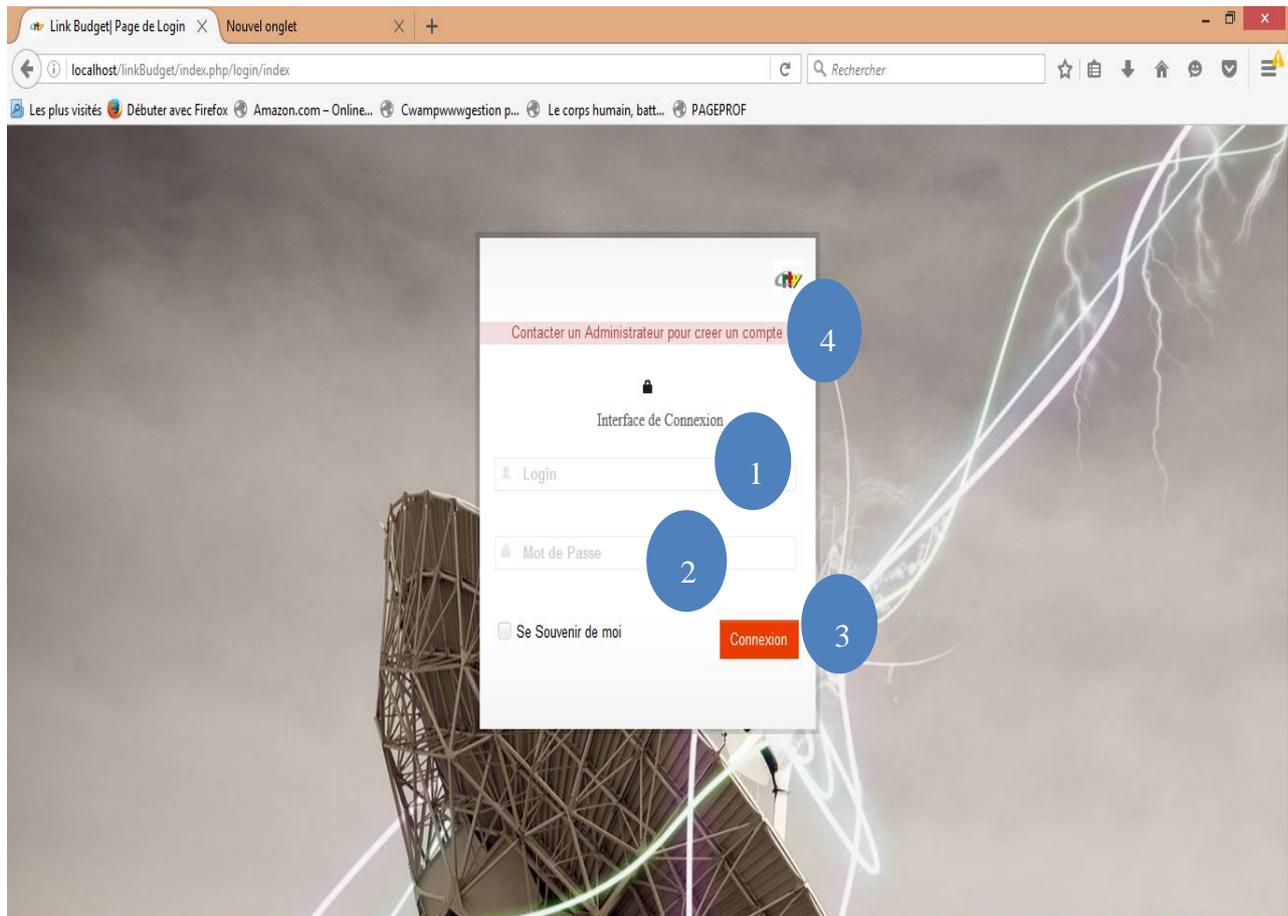


Figure 22 : page de Login

1. Cadre de login : l'utilisateur entre le login avec lequel il veut se connecter à l'application
2. Cadre de mot de passe : l'utilisateur rentre le mot de passe avec lequel il souhaite se connecter à l'application et qu'il utilisera pour les prochaines sessions de connexion
3. Connexion : cette opération est effective uniquement après que l'utilisateur ait rentré ses paramètres de connexion à l'application.
4. L'utilisateur ne peut se connecter à l'application que lorsque son compte a été préalablement créé par l'administrateur du système.

1.3. Page d'accueil

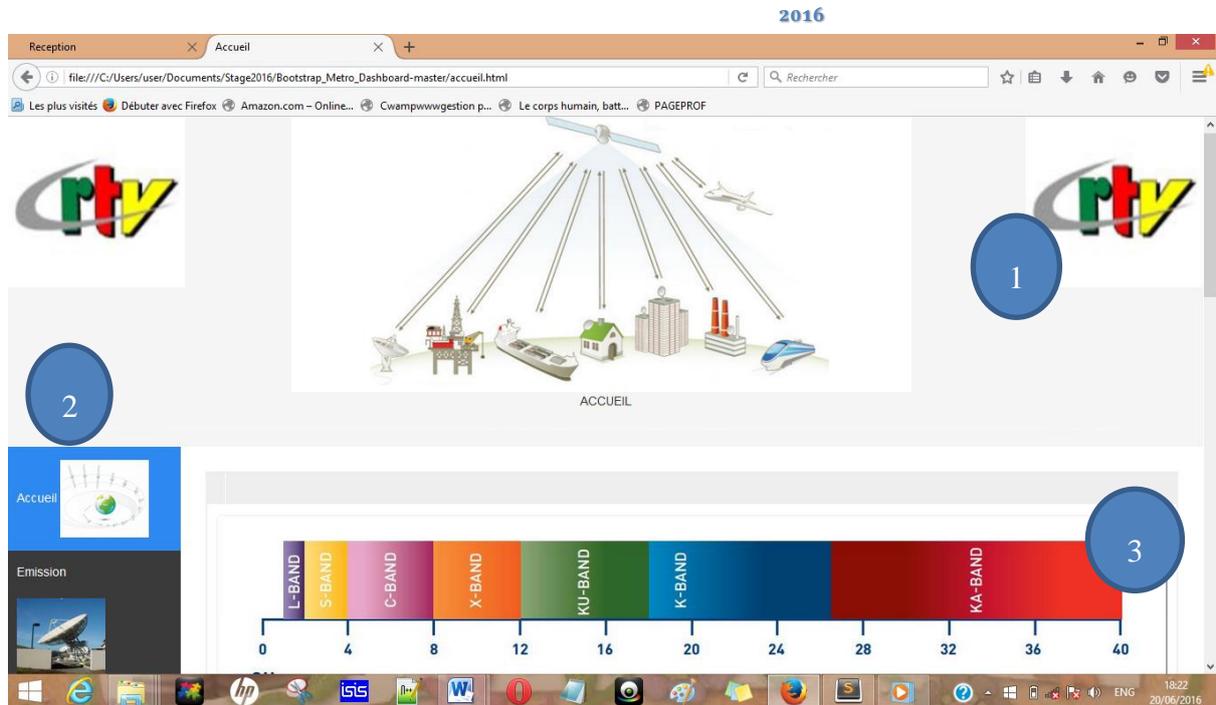


Figure 23 : Page d'accueil du calculateur

Une fois que l'utilisateur a été autorisé à avoir accès à l'application par la validation de son login et son mot de passe, il est dirigé par l'application vers la page d'accueil ci-dessus.

Sur la page d'accueil du calculateur, l'on retrouve le logo de la CRTV, une image représentant la diffusion du signal à partir d'un satellite vers diverses stations réceptrices. Au sol. Une barre de navigation gauche permettant d'avoir accès aux différentes parties du navigateur, et une image présentant l'étendue du spectre électromagnétique et la délimitation des différentes bandes de fréquence. En dehors des éléments cités ci-dessus, la page d'accueil présente également de trois bandes de fréquences de manière sommaire la bande Ka, la bande Ku et la bande C.

1.4. Liaison montante (Station émettrice)

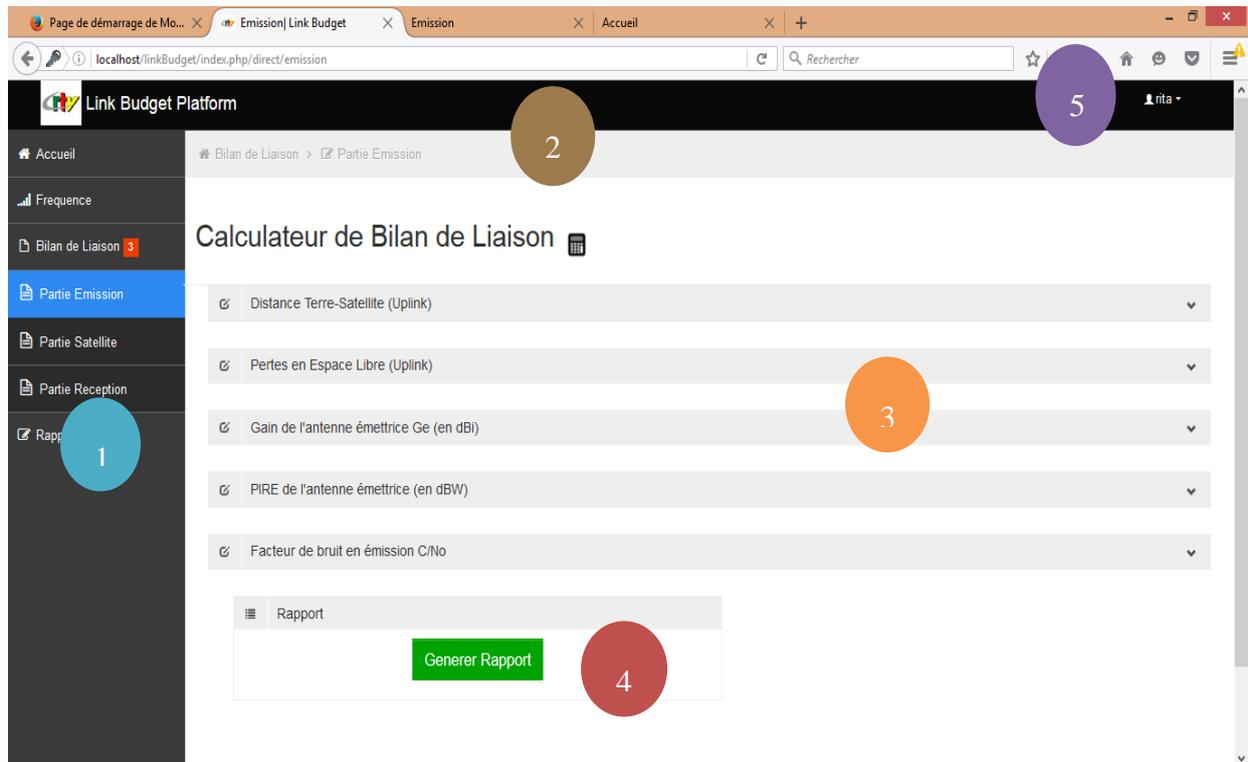


Figure 24 : Page de calcul liaison montante

Un clic sur l'onglet « Bilan de liaison » nous présente trois sous-onglets , « Partie émission », « Partie satellite » et « Partie réception ».

La page de calcul de la liaison montante présente les paramètres de liaison notamment ceux de la station émettrice, dans un formulaire de calcul des paramètres.

1. Menu principal du calculateur comprenant les différentes rubriques s'y trouvant dont la page d'accueil, les pages de calcul du bilan de liaison, la page des rapports de bilans de liaison.
2. La rubrique indicative de la page sur laquelle l'on se trouve (dans l'exemple ci-dessus la page de calcul partie émission concernant le lien montant).
3. Les paramètres calculés dans cette partie du bilan de liaison intervenants au niveau du lien montant et rentrant dans l'évaluation du bilan de liaison (Distance Terre-satellite, Pertes en espace libre, Gain de l'antenne d'émission, PIRE de l'antenne d'émission, Facteur de bruit en émission).

77

4. La partie de génération du rapport PDF qui permet à l'utilisateur de générer les rapports des bilans de liaison.
5. La rubrique renseignant sur l'utilisateur connecté actuellement à l'application.

2016

Figure 25 : Formulaire de calcul d'un paramètre

Lorsqu'on déroule l'un des paramètres listés ci-dessus, l'on voit apparaître un formulaire tel que présenté sur la figure ci-dessus.

Les formulaires de calcul des paramètres définis par le champ 3 de la page de calcul possèdent tous les différentes rubriques suivantes :

- 78 1. L'encadré dans lequel est spécifié le nom du paramètre que l'on va évaluer par calcul (Distance Terre-satellite dans l'exemple ci-dessus),
2. Le premier paramètre de calcul possède une zone de texte active qui permettra une fois remplie d'avoir accès aux zones de texte des autres paramètres de calcul.

3. Les zones de texte pour le calcul des paramètres ne peuvent être remplies que progressivement. Chaque paramètre une fois rempli active la zone de teste du paramètre suivant. (dans l'exemple ci-dessus le paramètre longitude est activé et une fois que l'utilisateur remplit la zone de texte il a la possibilité de remplir celles des paramètres latitude et altitude).
4. La zone de texte 'Résultat' où est affichée après calcul la valeur du paramètre évalué. Cette zone de texte est totalement désactivée afin que l'utilisateur ne puisse pas modifier la valeur du résultat une fois calculée.
5. Le bouton calculer qui permet d'exécuter la fonction de calcul du paramètre.

1.5. Paramètres satellitaires

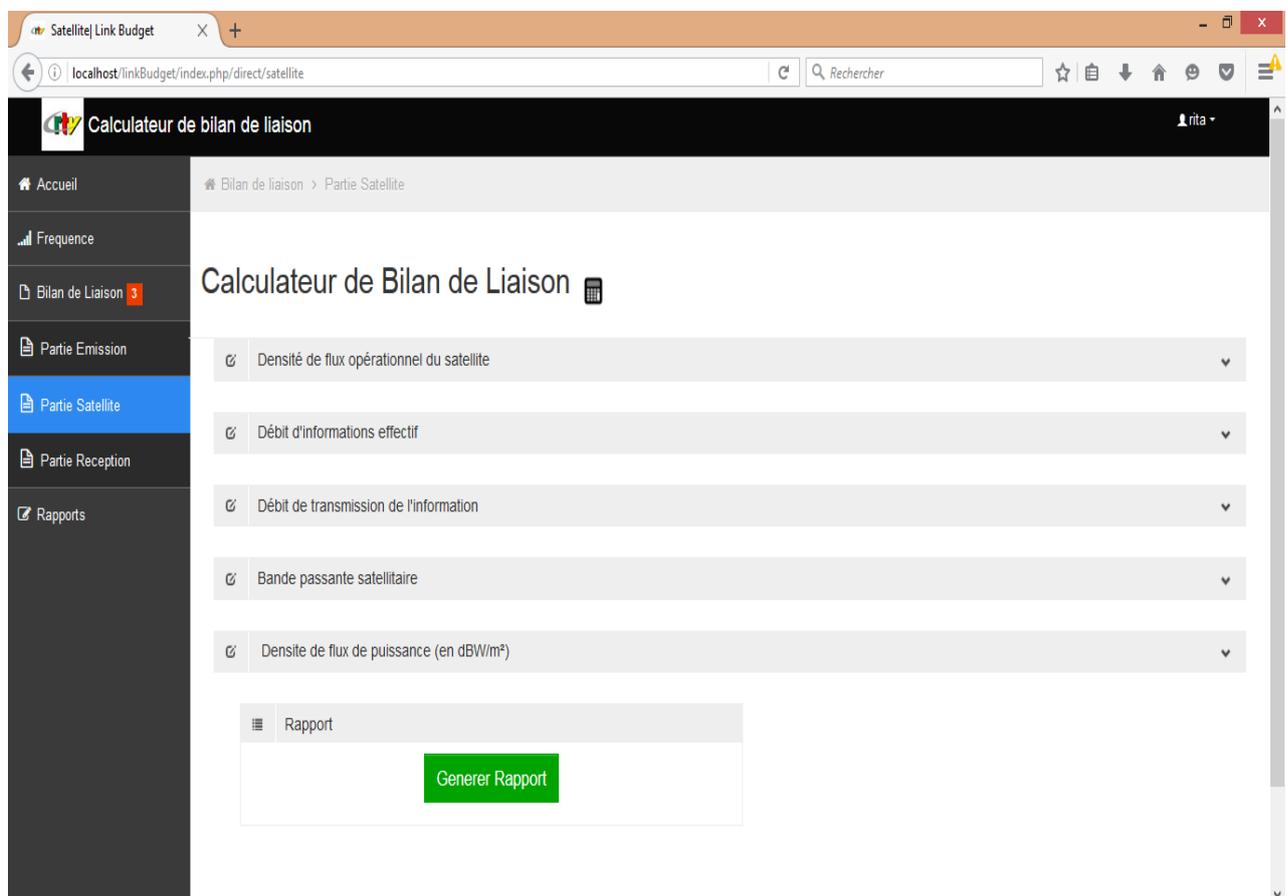


Figure 26 : Page de calcul paramètres satellitaires

79

Ensuite, l'onglet « Partie satellite » donne accès aux paramètres complémentaires à évaluer coté satellite.

La page de calcul des paramètres satellitaires comporte tout comme celle de la station émettrice un formulaire de calcul des paramètres du bilan de liaison coté satellite. Avec pour cette partie les paramètres : Densité de flux opérationnel du satellite, Débit d'informations effectif, Débit de transmission de l'information, Bande passante satellitaire, Densité de flux de puissance.

1.6. Liaison descendante (Station réceptrice)

Figure 27 : Page de calcul liaison descendante (Downlink)

Enfin, l'onglet « Partie réception » en bleu, permet d'évaluer les paramètres de liaison coté récepteur.

La page de calcul de la liaison descendante permet grâce à son formulaire d'évaluer les paramètres de la liaison descendante tels que : la distance Terre-satellite en Downlink, le gain de l'antenne de réception, les pertes en espace libre, la puissance du signal reçu (au niveau de

l'antenne), la puissance du signal reçu par l'utilisateur, la température de bruit du système, la puissance du bruit en réception et le rapport signal/bruit en réception.

2016

1.7. Exemple de rapport PDF généré

Nous présentons ici l'exemple d'un rapport de liaison partie émission uniquement, tel que généré à la fin des calculs des paramètres de liaison de la station émettrice :

Rapport du Calculateur de Bilan de Liaison: Partie Emission

Distance Terre-Satellite (Uplink) :

57674.82

Pertes en Espace Libre (Uplink) :

145.117

Gain de l'Antenne émettrice G_e (en dBi) :

55.441

PIRE de l'antenne émettrice(en dBW) :

205.441

Facteur de bruit en emission C/N_0 :

442.266

8

Ce rapport est généré au format PDF, avec les possibilités pour l'utilisateur de le télécharger, de l'enregistrer, de l'imprimer, de le supprimer.

2016

9. Exemple de calcul d'un bilan de liaison en bande C, Ku et en bande Ka

Paramètres de liaison	Bande C	Bande Ku	Bande Ka
Distance Terre-satellite (uplink)	42306..968	42306..968	42306..968
Gain de l'antenne (uplink)	43.892	51.308	55.865
PIRE antenne (uplink)	37.364	44.78	49.337
Pertes en espace libre (uplink)	139.514	142.735	144.714
Facteur de bruit en émission	71.344	71.344	71.344
Densité de flux opérationnel	-126.836	-112.892	-108.335
Débit d'informations effectif	9.804	9.852	10
Débit de transmission de l'information	13.072	13.136	13.333
Bande passante satellitaire	9.15	9.195	9.333
Densité de flux de puissance	1.7792892215 465833e-9	1.779289221546 5833e-9	1.779289221 5465833e-9
Distance Terre-satellite (downlink)	39627.144	39627.144	39627.144
Gain de l'antenne réceptrice	44.214	51.63	56.187

82

Puissance du signal reçu	46.947	51.142	53.72
Puissance reçue par l'utilisateur	46.447	50.642	53.22
Pertes en espace libre (downlink)	139.267	142.488	144.467
Température de bruit du système	18.7	18.7	18.7
Puissance de bruit du récepteur	-174.466	174.466	174.466
Rapport signal/bruit en réception	221.413	221.413	221.413

2. Evaluation des résultats obtenus

Pour des calculs effectués pour trois fréquences différentes, notamment à 6.175GHz, à 14.5GHz et 24.5GHz, et considérant que les atténuations atmosphériques gardent les mêmes valeurs, l'on peut effectuer les remarques suivantes sur les bilans de liaison établis :

- Le gain de l'antenne d'émission et la perte de l'antenne d'émission augmentent plus on grandit en fréquence, de même, les pertes en espace libre deviennent de plus en plus importantes, on mesure environ 5dB de pertes supplémentaires plus on grandit en fréquence.
- La densité de flux opérationnel du satellite décroît, signifiant ainsi que, la quantité de signal ou le niveau du signal arrivant sur les antennes de réception du satellite se dégrade plus on monte en fréquence. Les pertes en considérant les mêmes paramètres pour la liaison montante pour ces trois fréquences s'élèvent à environ 18dB, affaiblissement considérable du signal.
- En réception, les pertes en espace libre se trouvent également augmentées, de qui traduit le fait qu'en considérant l'influence réelle des facteurs atmosphériques sur le signal et additionné à ces pertes, le niveau du signal reçu est fortement atténué, car l'influence des facteurs atmosphériques, qui n'a pas été prise en compte dans ces calculs, s'en va croissante avec l'excursion en fréquences.

Les conclusions que l'on peut tirer des précédents résultats sont les suivantes :

- Il est possible d'effectuer une diffusion du signal en bande Ka, exploitant les mêmes dimensions des équipements que ceux utilisés ²⁰¹⁶ dans les bandes de fréquences inférieures, bénéficiant d'une augmentation du débit de transmission de l'information en fonction de l'excursion en fréquences.
- L'excursion en fréquences permet également de réduire la taille des équipements utilisés et d'accroître le gain des antennes plus on augmente en fréquences.
- Dans les zones tropicales, sujettes à de fortes atténuations atmosphériques, la diffusion et la transmission du signal se trouveront fortement perturbées, et la puissance du signal reçu atténuée, notamment par le taux de précipitations élevé, mais restent toutefois possible, moyennant certains réglages et certains ajustements pour la bande Ka.

2.2. Méthodes de compensation

En transmissions numériques, il est important que la transmission se passe sans erreurs afin d'assurer une bonne reconstitution du signal car, les données transmises étant compressées, elles deviennent plus sensibles aux erreurs de transmission. Une baisse du niveau du signal peut, dans certains cas, causer la rupture de la communication.

Il est donc nécessaire de formuler des méthodes de compensation de l'atténuation du niveau du signal, afin d'assurer la fiabilité de la transmission. On a de manière logique, deux méthodes de compensation qui s'imposent : transformer ou changer certains équipements et éléments de la chaîne de transmission ou modifier les paramètres de la chaîne de transmission en termes de performance, des paramètres tels que la puissance, le rendement du code, en conservant la chaîne de transmission originelle.

Certaines techniques de compensation ont vu le jour parmi lesquelles nous pouvons présenter :

2.2.1. Le contrôle de puissance

Son principe consiste à adapter le niveau de puissance émise par l'émetteur aux conditions de propagation. Dans le cas d'une transmission en ciel clair, le contrôle de puissance permet de transmettre la puissance minimale pour assurer la qualité de service requise. Ceci évite la transmission d'une marge de puissance supplémentaire afin de lutter contre les atténuations. Dans le cas d'une transmission avec dégradation du signal suite à des intempéries, le contrôle de puissance permet de compenser les pertes en augmentant le niveau de la puissance transmise. Cette technique, bien que ne nécessitant pas de modifications au importantes au niveau du récepteur, nécessite pour l'activation du processus, des éléments externes tels qu'une station centrale donnant la possibilité d'activer le contrôle de puissance.

2.2.2. Techniques de diversité

Elles impliquent la modification de la chaîne de transmission de l'information. Il en existe quatre :

- **Diversité de site** : il s'agit ici de rediriger le signal vers une autre station distante, dans le cas où une station donnée souffrirait de mauvaises conditions de propagation, donnant ainsi la possibilité à la seconde station d'émettre en direction du satellite. Cette technique est motivée par le fait que les précipitations ont une étendue géographique bien déterminée de l'ordre d'une dizaine de kilomètres de diamètre, donc, une station située à quelques dizaines de kilomètres pourrait secourir celle en difficultés. D'autant plus que, les précipitations dans une zone donnée sont indépendantes des zones voisines. On peut ainsi améliorer la disponibilité du système de transmission. Toutefois, il serait nécessaire pour cela de disposer d'une connexion entre les stations et engendre, pour la multiplication des stations, des coûts supplémentaires.
- **Diversité en fréquences** : il s'agit ici de changer la fréquence d'émission lorsque le signal transmis à la fréquence active subit une atténuation. En bande Ka, les fréquences étant affectées de manière quasi-identique par les atténuations atmosphériques, cette technique s'avère être complexe.

- **Diversité satellite** : tout comme la diversité de site, il s'agit ici d'émettre le signal vers un autre satellite émettant dans la même bande de fréquence, dont la liaison avec la Terre ne subit pas une grande atténuation au moment de la transmission. Ceci peut être idéal pour les systèmes satellitaires possédant des constellations de satellites, non géostationnaires. Toutefois, elle nécessite une grande précision en terme de pointage de l'antenne pour l'orientation du signal vers le nouveau satellite.
- **Diversité dans le temps** : cette technique consiste à transmettre et recevoir uniquement lorsque le temps est favorable, donc ne constitue pas réellement une méthode de compensation. Elle est notamment incompatible pour des systèmes de communication dans lesquels il est nécessaire de bénéficier d'une disponibilité du service en permanence.

En dehors de ces techniques, l'on retrouve également :

- **La technique de variation du débit utile** : ici, il est question d'augmenter l'énergie des bits transmis, en considérant des bits avec une durée plus longue tout en gardant un même niveau de puissance transmise. La chaîne de transmission est ainsi plus fiable suite à l'augmentation de l'énergie par bit utile. Le nouveau signal transmis correspond à une nouvelle séquence binaire qui occupe une bande spectrale moins large par rapport au signal de départ car la durée d'un bit est plus longue. Une durée de bits plus longue correspond à un débit binaire moins important. La réduction du débit utile signifie que la transmission d'une même quantité d'information nécessite plus de temps et plus d'énergie.
- **Modification du taux de codage** : le codage canal permet d'améliorer les performances en puissance du signal transmis. La distribution des erreurs dans le canal est une donnée importante qui influence les performances d'un code canal. Le type de code doit donc être choisi en fonction de cette distribution qui est fonction du canal utilisé. A la suite d'une dégradation du rapport signal sur bruit, la diminution du taux de codage améliore les performances en puissance, en augmentant l'énergie par bits, on double ainsi le gain en transmission.

Conclusion générale

2016

L'objectif de notre mémoire était d'évaluer, au moyen d'un calculateur de bilan de liaison conçu et réalisé par nos propres moyens, les performances de la bande Ka en transmission.

Nous avons procédé tout d'abord à la conception et la réalisation d'un calculateur de bilan de liaison, permettant d'évaluer de manière dynamique la qualité des liaisons satellitaires en présentant les fonctionnalités et l'architecture requises pour l'application, le processus de calcul de l'application, le processus de calcul des différents paramètres de liaison ainsi que l'utilité des résultats obtenus, ensuite, au moyen de ce calculateur, nous avons évalués les résultats obtenus pour une liaison établie en bande Ka, comparativement à des liaisons établies en bande C et Ku.

Nous avons pu formuler comme conclusions suite à cette étude que le signal radio se trouve fortement affecté par l'excursion en fréquences. Il subit de fortes atténuations sous l'influence des facteurs atmosphériques, au fur et à mesure que l'on augmente la fréquence.

Afin de palier à ces problèmes rencontrés par la propagation du signal, certaines techniques de compensation ont vu le jour, et proposent chacune, une solution, non idéale, mais qui pourrait s'avérer être nécessaire pour le déploiement de systèmes de radiodiffusion par satellite en bande Ka, et pour une exploitation optimale des ressources du canal de transmission.

En conséquence, nous émettons en perspective :

- L'étude et le développement d'une méthode de compensation résultant de la combinaison de deux ou plus des différentes méthodes de compensation présentées.
- Le développement d'une plateforme de suivi des liaisons satellitaires en temps réel pour le monitoring des liaisons, donnant à tout instant et de manière dynamique, l'état des liaisons satellitaires en termes d'atténuation atmosphérique.

2016

Bibliographie

2016

- [1] Nouvelles de l'ITU « Des satellites partout, des satellites », mars 2015
- [2] Manuel ITU sur les télécommunications par satellite
- [3] Introduction au trafic satellite, calcul des bilans de liaison, Matthieu François, 2014
- [4] *Cours de Systèmes de télécommunications par satellite*, Dr BELL Georges, 2015
- [5] Rec. UIT-R V.431-6 « *Nomenclature des bandes de fréquences et de longueurs d'ondes employées en télécommunications* »
- [6] *Télécommunications numériques, le CDMA*, Jeremy LAINE et Philippe VIGNERON, 2000-2001
- [7] *Protocol of Communications for VORSAT satellite, Link Budget*, Carlos Jorge Rodrigues Capela, April 2012
- [8] *Principes de télécommunications analogiques et numériques*, Marc Van Droogenbroeck, février 2013
- [9] *Protocol of Communications for VORSAT satellite, Link Budget*, Carlos Jorge Rodrigues Capela, April 2012
- [7] ITU NEWS N°5 2015, *Protection des fréquences essentielles aux services par satellite*, Rupert Pearce, *Président de l'Association Européenne des opérateurs de satellites (ESOA)*, Directeur Général d'Inmarsat
- [8] ANNALS OF GEOPHYSICS ,56, 5, 2013, Cloud attenuation studies of the six major climatic zones of Africa for Ka and V satellite system design, Temidayo Victor Omotosho, Jit Singh Mandeep, Mardina Abdullah.
- [9] Recommandation UIT-R F.140 1, *Bandes de fréquences utilisables par les systèmes d'accès hertzien fixe et méthodologie d'identification de ces bandes.*
- [10] ANNALS OF GEOPHYSICS ,56, 5, 2013, Cloud attenuation studies of the six major climatic zones of Africa for Ka and V satellite system design, Temidayo Victor Omotosho, Jit Singh Mandeep, Mardina Abdullah

[11]

https://fr.wikipedia.org/wiki/Coordonn%C3%A9es_g%C3%A9ographiques#/media/File:Latitude_and_Longitude_of_the_Earth.svg, consulté le 01/06/2016

2016

[12] https://fr.wikipedia.org/wiki/Coordonn%C3%A9es_g%C3%A9ographiques, consulté le 01/06/2016

[13] Recommandation UIT-R M.1079-2, Exigences imposées à la qualité globale et à la qualité de service pour les télécommunications mobiles internationales-2000 (IMT-2000), page 5.

[14] ITU NEWS N°5 2015, Protection des fréquences essentielles aux services par satellite, Rupert Pearce, Président de l'Association Européenne des opérateurs de satellites (ESOA), Directeur Général d'Inmarsat.

[15] Recommandation UIT-R F.140 1, Bandes de fréquences utilisables par les systèmes d'accès hertzien fixe et méthodologie d'identification de ces bandes.

[16] ANNALS OF GEOPHYSICS ,56, 5, 2013, Cloud attenuation studies of the six major climatic zones of Africa for Ka and V satellite system design, Temidayo Victor Omotosho, Jit Singh Mandeep, Mardina Abdullah.

[17] Référence : http://tahe.developpez.com/web/php/mvc/?page=page_1 consulté le 17/08/2016

[18] *Etude comparative des performances accrues de schémas de transmission CDMA et OFDM pour des communications par satellite*, KRIM Khadidja, 2010

[19] *Satellite Communications at Ku, Ka, and V Bands : Propagation Impairments and Mitigation Techniques*, Athanasios D. Panagopoulos, 2004

2 ANNEXE A : LE STANDARD DVB-S2

2016

Le DVB-S2 est un standard de transmission en matière de transmission du contenu multimédia par satellite. Il a été conçu, entre autre, pour remplacer la norme existante de diffusion de la vidéo numérique par satellite, le DVB-S. il couvre une gamme de services plus étendue autre que la diffusion telle que les services interactifs avec une voie retour via satellite. La norme DVB-S2 permet aussi de réaliser des communications point-à-point lors des transmissions occasionnelles de certains évènements.

La diversité des schémas de codage canal et de modulation permet au standard DVB-S2 de s'adapter à un large champ d'applications dont les exigences sont différentes. Dans le cas des services de diffusion de la vidéo et de l'audio haute définition, la nouvelle norme permet un gain de 25% et 30% en efficacité spectrale par rapport aux standards existants équivalents.

L'adoption d'une forme d'onde adaptative dans le cas d'une transmission point-à-point interactive est bien plus intéressante. Les échanges des informations relatives au canal de propagation permettent de sélectionner la constellation et le taux de codage les plus appropriés aux conditions de propagation. Cette solution améliore la capacité d'un transpondeur d'un facteur qui varie entre 100% et 200%. En plus du gain obtenu en capacité, la liaison adaptative permet de garantir une meilleure disponibilité du système. L'échange des informations relatives aux conditions de propagation peut s'effectuer soit via le satellite même ou bien à travers une infrastructure Terrestre.

2016