



HAL
open science

Évaluation de l’empreinte carbone de la transmission d’un gigaoctet de données sur le réseau RENATER

Marion Ficher, Françoise Berthoud, Anne-Laure Ligozat, Patrick Sigonneau,
Badis Tebbani, Maxime Wisslé

► **To cite this version:**

Marion Ficher, Françoise Berthoud, Anne-Laure Ligozat, Patrick Sigonneau, Badis Tebbani, et al..
Évaluation de l’empreinte carbone de la transmission d’un gigaoctet de données sur le réseau RE-
NATER. Centre de Recherche Interdisciplinaire; GIP RENATER. 2021. hal-04197870

HAL Id: hal-04197870

<https://hal.science/hal-04197870v1>

Submitted on 6 Sep 2023

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

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

Rapport : évaluation de l'empreinte carbone
de la transmission d'un gigaoctet de données
sur le réseau RENATER

Tables des matières

TABLES DES MATIERES	1
INTRODUCTION	3
I) ORIENTATION DE L'ETUDE	4
I.1) UNITE FONCTIONNELLE	4
I.2) FRONTIERES DU SYSTEME	4
I.3) SCENARIO DE REFERENCE ET HYPOTHESES DE CE SCENARIO	6
I.4) COLLECTE DES DONNEES	6
II) INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE	7
II.1) INVENTAIRE DES FLUX	7
II.2) ÉTAPES PRINCIPALES DE TRANSMISSION DE DONNEES SUR LE BACKBONE DE RENATER	8
II.3) ÉQUIPEMENTS	10
II.3.1) LES ROUTEURS	10
II.3.2) LES COMMUTATEURS OTN	11
II.3.3) LES PLATEFORMES DE TRANSPORT OPTIQUE WDM	11
II.3.4) LES CABLES DE FIBRE OPTIQUE	12
II.3.5) LE NOC	12
II.3.5) TABLEAU RESUME DES EQUIPEMENTS	12
II.4) MODELE DE CALCUL DES EMISSIONS DE GES POUR LA TRANSMISSION D'UN GO	13
II.4.1) PRINCIPE GENERAL DU CALCUL DES EMISSIONS DE GES POUR UN GIGAOCTET	13
II.4.2) CALCUL D'ÉMISSIONS CO ₂ e DES BLOCS	14
II.4.2.1) Calcul des émissions CO ₂ e liées à l'utilisation des équipements	14
II.4.2.2) Calcul des émissions CO ₂ e liées à la fabrication des équipements	14
II.4.2.3) Calcul final des émissions CO ₂ e d'un bloc	15
II.4.3) CALCUL DE LA PART DE SUPERVISION DU NOC	15
II.4.4) CALCUL DE LA PART DE LA FIBRE OPTIQUE	16
II.5) BLOC ENVOI DU NR EMETTEUR	16
II.6) BLOC RECEPTION ET ENVOI DU NR PASSANT	16
II.7) BLOC AMPLIFICATION SIGNAL SHELTER	16
II.8) BLOC RECEPTION DU NR RECEPTEUR	17
II.9) BLOC SUPERVISION NOC	17
II.10) PART DE LA FIBRE OPTIQUE	18
II.11) DETAILS DES CALCULS D'EXTRAPOLATION	18
II.11.1) ÉMISSIONS CO ₂ e LIEES AU TRANSPORT DES ROUTEURS JUNIPER MX2010	19

II.11.2) ÉMISSIONS CO ₂ E LIÉES A LA FABRICATION DES EQUIPEMENTS DE TRANSPORT OPTIQUE INFINERA	19
II.11.3) CONSOMMATION ELECTRIQUE DES PLATEFORMES DE TRANSPORT OPTIQUE WDM DES SHELTERS	21
II.12) VERIFICATION DES DONNEES	21
III) ÉVALUATION DE L'EMPREINTE CARBONE	23
III.1) ÉVALUATION DE L'EMPREINTE CARBONE DES BLOCS	23
III.2) ÉVALUATION DE L'EMPREINTE CARBONE DE LA PART DU NOC	26
III.3) ÉVALUATION DE L'EMPREINTE CARBONE DE LA PART DE LA FIBRE OPTIQUE	26
III.4) ÉVALUATION DE L'EMPREINTE CARBONE DE LA TRANSMISSION DE 1 GO	27
IV) RESULTATS	28
IV.1) SCENARIO DE REFERENCE	28
IV.2) ANALYSES DE SENSIBILITE	30
IV.2.1) EN FONCTION DE LA DENSITE DE L'INFRASTRUCTURE RESEAU	30
IV.2.2) EN FONCTION DU PUE	30
IV.2.3) EN FONCTION DE LA DUREE DE VIE DES EQUIPEMENTS	31
IV.2.4) EN FONCTION DU FACTEUR D'EMISSION ELECTRIQUE	32
IV.2.5) EN FONCTION DU TRAFIC IP SUR LES EQUIPEMENTS	33
CONCLUSION	35
ANNEXES	38
REFERENCES	38
SIGLES	39
GLOSSAIRE	40

Introduction

Dans cette étude, nous cherchons à déterminer le potentiel de réchauffement climatique pour **1 Go** transféré sur le réseau de RENATER (partie du réseau appelé backbone) par un calcul d'empreinte carbone.

Le réseau RENATER est le réseau dédié à la recherche en France. Il est très similaire aux grandes artères des réseaux grand public à la différence près que seuls les flux à destination ou au départ d'organismes de recherche/enseignement supérieur transitent par ce réseau.

Le périmètre de notre étude inclut le réseau lui-même (fibres optiques et équipements actifs : routeurs, commutateurs OTN et amplificateurs) et le centre de supervision du réseau (NOC). Par contre, nous ne prenons pas en compte les réseaux locaux qui transportent les flux jusqu'aux usagers finaux, ni les équipements terminaux. Les valeurs trouvées sont donc à considérer comme des minimas par rapport au transport d'une donnée de son point d'émission au point de destination.

Notre démarche vise à trouver des **leviers d'actions** pour réduire l'impact des données sur le réseau RENATER.

I) Orientation de l'étude

Etant donné le temps limité de cette étude et l'absence de données fiables sur les autres indicateurs d'impact, seul le potentiel de réchauffement climatique est étudié. Son unité est exprimée en kg équivalent CO₂ ou noté kg CO₂e. Il prend en compte les émissions de multiples substances d'origine anthropique telles que le dioxyde de carbone (CO₂), le protoxyde d'azote (N₂O), le méthane (CH₄), les chloro-fluoro-carbures (CFC), etc. Ces substances sont responsables du réchauffement climatique.

Nous avons inclus dans la mesure du possible les émissions de GES émis pendant la fabrication des équipements. En revanche, nous n'avons pas pris en compte la fin de vie des équipements par manque de données.

I.1) Unité fonctionnelle

Dans cette étude, l'unité fonctionnelle retenue est :

« Transmettre 1 Go de données entre Orsay et Montpellier par une liaison en fibre optique ».

I.2) Frontières du système

La figure 1 illustre le périmètre de l'étude. Dans cette figure, tous les équipements nécessaires à la transmission de données entre deux établissements d'ESR sont visibles. Les équipements recensés dans l'encadré bleu sont les éléments pris en compte par notre étude. Ce sont les équipements de transport optique (commutateur OTN et plateforme de transport optique WDM) et les équipements de routage (routeur). Le centre de supervision est une structure comprenant de multiples équipements et des personnels dédiés pour superviser le réseau. Les encadrés roses sont les nœuds sur le réseau RENATER.

Dans le réseau RENATER, il y a deux types de nœuds :

- NR ou Nœud RENATER : site¹ ou datacentre accueillant les équipements de routage et de transport optique. Le réseau RENATER est composé de 72 NR.
- Shelter : situés entre 2 NR, les shelters se situent tous les 80 à 120 km et hébergent des équipements de transport optique WDM servant à l'amplification des signaux lumineux optiques.

¹ Les sites sont des établissements partenaires du GIP, soit un centre de recherches ou une université.

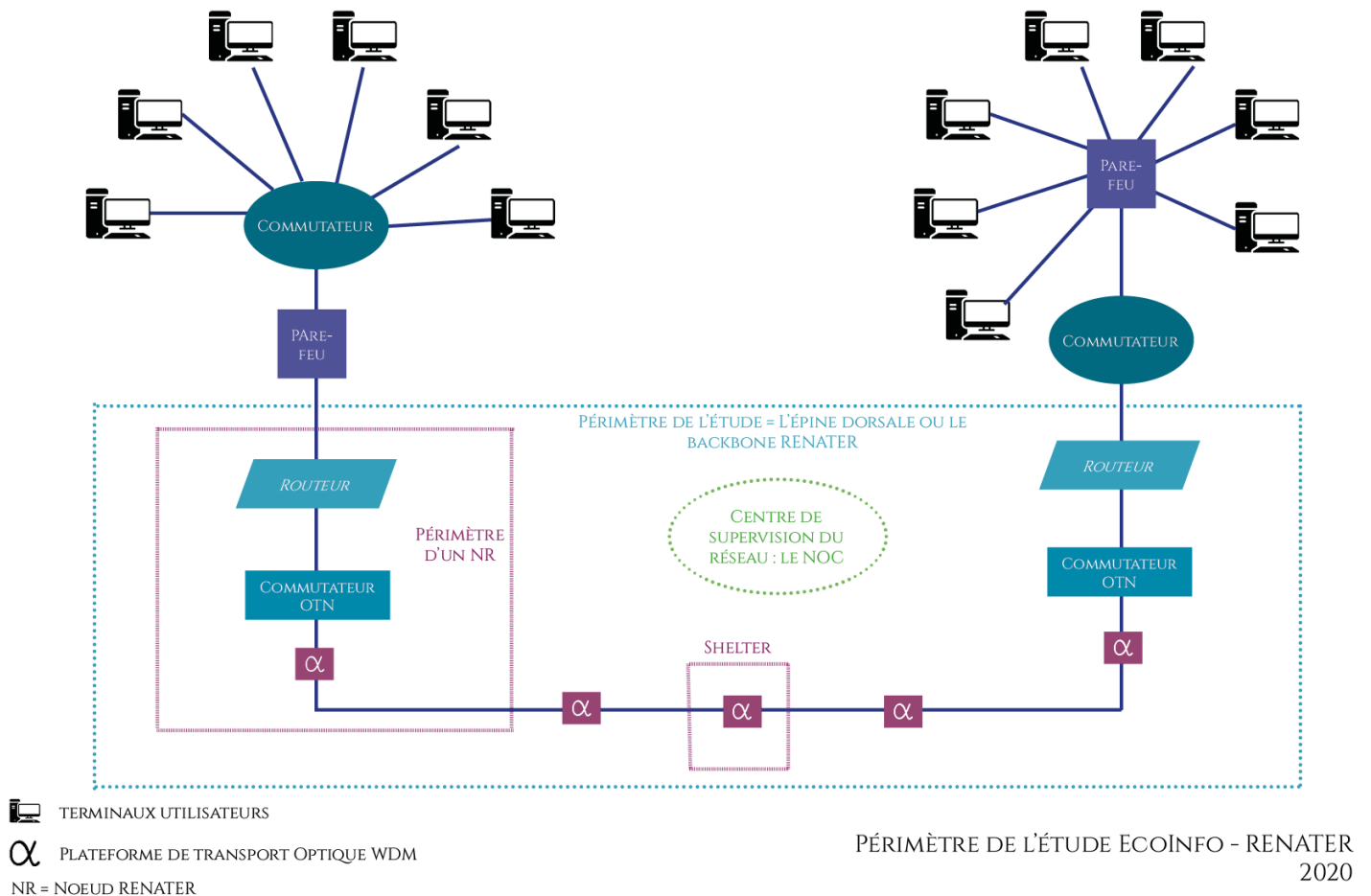


Figure 1 - périmètre du système étudié lors de l'évaluation de l'empreinte carbone de la transmission de données sur le réseau RENATER

Le système étudié inclut les étapes suivantes :

- La transmission de données sur le backbone uniquement c'est-à-dire la transmission depuis le premier équipement de routage connecté à l'établissement utilisateur émetteur jusqu'au dernier routeur du backbone directement connecté à l'établissement utilisateur récepteur.
- L'utilisation des équipements de transport optique (commutateurs OTN et plateformes de transport optique WDM) et de routage (routeurs) utiles à la transmission de données.
- La fabrication/transport des équipements de transport optique (commutateurs OTN et plateformes de transport optique WDM) et de routage (routeurs) nécessaires à la transmission de données. La fabrication prend en compte l'extraction des matières premières, la production des composants, l'assemblage des composants et le transport des équipements.
- La supervision par le NOC. Le NOC est une structure de supervision 24/7 qui gère les incidents du réseau et maintient le service. Il est composé d'une équipe humaine et de matériels informatiques utilisés dédiés uniquement à la supervision (serveur, routeurs, ordinateurs, écrans).
- La fabrication, la distribution, l'installation et l'utilisation des câbles de fibre optique de l'ensemble du réseau RENATER.

Le système étudié ne prend pas en compte les éléments suivants :

- Les émissions de GES générées par la fabrication des bâtiments hébergeant les équipements.
- Les émissions de GES générées par la fin de vie des équipements de l'étude, notamment le recyclage, par manque de données fiables.

- Les émissions de GES générées par les individus participant à la conception, à l'ingénierie et à la maintenance au sein de RENATER et au sein du NOC.

I.3) Scénario de référence et hypothèses de ce scénario

Notre scénario de référence est la transmission de 1 Go de données d'un établissement ESR (NR Orsay) à un autre établissement ESR (NR Montpellier) connectés au réseau RENATER, à travers la fibre optique.

Nous faisons les hypothèses suivantes :

- **Le PUE² des sites des nœuds du réseau (NR et shelters) est de 1,8.** J. Aslan et al. (2018)³.
- **La durée de vie des équipements correspond à la durée d'utilisation sur le réseau RENATER.**
- **Le trafic IP transitant sur un équipement est constant au cours de la durée de vie de l'équipement.**

I.4) Collecte des données

La plupart des données utilisées pour l'étude proviennent de **mesures directes** ; c'est notamment le cas pour la consommation électrique des équipements et le trafic IP des équipements nécessaires à la transmission de données. Les collectes de données se sont faites pendant la période de déconfinement de la crise sanitaire du COVID-19 en juin 2020. Durant cette période, le trafic sur RENATER était inférieur au trafic durant une période normale d'activités parce que la plupart des universités étaient encore fermées et les personnels étaient en télétravail. Le trafic sur le réseau RENATER a donc été réduit au profit du trafic sur les autres FAI (Free, Orange, SFR, etc.).

En complément des mesures directes, nous avons utilisé des données annuelles de trafic (2019) qui nous ont permis de calculer les indicateurs sur un jour moyen (2019).

Les données recherchées sont :

- La consommation électrique par équipement et par jour : correspond à la quantité d'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner l'équipement durant une journée.
- Le trafic IP par équipement sur une journée : correspond à la quantité de données ayant transité sur l'équipement durant une journée.
- Le trafic IP par équipement sur une année : correspond à la quantité de données ayant transité sur l'équipement durant une année.
- La durée de vie par équipement : est égale à la durée d'utilisation de l'équipement sur le réseau.
- L'impact de fabrication par équipement : correspond à la quantité de GES émis durant la production et le transport d'un équipement.
- L'ensemble du trafic transitant sur le réseau RENATER durant une année : correspond à la quantité de données transitant sur tout le réseau RENATER durant une année
- L'inventaire des équipements nécessaires au NOC ainsi que leur consommation électrique annuelle : correspond à l'ensemble des équipements de supervision utilisés par le NOC, dans le plateau de l'équipe et sur le réseau. Pour tous ces équipements, nous récupérons la consommation électrique annuelle de l'équipement.
- Le nombre de kilomètres de fibre optique installée sur le réseau RENATER : correspond au nombre de kilomètres de câbles de fibre optique installés sur le réseau.

² Le PUE (Power Usage Effectiveness) est le ratio entre la consommation électrique des équipements nécessaire pour l'alimentation du site d'accueil de l'équipement (refroidissement, salle, alimentation, etc) et la consommation électrique nécessaire pour alimenter l'équipement étudié.

³ J. Aslan, K. Mayers, J. G. Koomey and C. France, « Electricity Intensity of Internet Data Transmission - Untangling the Estimates », Journal of Industrial Ecology, Volume 22 numéro 4, 2018, DOI : 10.1111/jiec.12630

Nos sources de données sont :

- Le GIP RENATER :
 - Mesures directes de la consommation électrique et du trafic IP sur une journée des équipements de transport optique (commutateurs OTN et plateformes de transport optique WDM) et des équipements de routage (routeurs).
 - Métrologie : mesures directes de l'ensemble du trafic IP sur une année par équipement et mesures directes de l'ensemble du trafic IP sur le réseau durant une année.
 - Ingénierie réseau : pour la durée de vie des équipements et le nombre de kilomètres de fibre optique sur le réseau.
- L'équipementier Cisco (fournisseur d'équipements réseau) : résultats d'ACV fournis par l'entreprise pour connaître l'impact carbone de fabrication de leurs routeurs, incluant la production et le transport des équipements.
- L'équipementier Juniper (fournisseur d'équipements réseau) : données concernant l'impact de production des composants des routeurs.
- Le fabricant Acome (fabricant de fibre optique) : résultats d'ACV pour extraire le facteur d'émission de la fibre optique, incluant sa fabrication, sa distribution, son installation et son utilisation.
- Le NOC : mesures directes de la consommation électrique des équipements utilisés par l'équipe dans le centre de supervision.
- La base de données ELDC⁴ : pour le facteur d'émission électrique en France.
- Le logiciel Ecodiag d'EcolInfo : pour calculer l'impact de fabrication des équipements du NOC.

Nous avons également utilisé des données extrapolées issues des sources suivantes :

- L'équipementier ADVA : résultats d'une ACV faite sur des équipements de transport optique similaires à un de nos équipements. Leur ACV nous a permis de calculer l'impact de fabrication des équipements de transport optique de l'étude (commutateur OTN et plateforme de transport optique WDM).
- Optiperf, un logiciel interne du GIP RENATER : récupération de la puissance pour calculer la consommation électrique moyenne des plateformes de transports optiques WDM présentes dans les shelters.
- L'équipementier Cisco : résultats d'ACV sur des routeurs. Leur ACV nous a permis de calculer l'impact de transport des autres routeurs de l'étude.

Nous avons utilisé une donnée de la littérature scientifique :

- Étude de J. Aslan et al. (2018)⁵ : PUE moyen actuel.

II) Inventaire du Cycle de Vie

II.1) Inventaire des flux

Les flux entrants du système étudiés sont :

- **La consommation d'énergie** : son unité est le kilowatt-heure, notée kWh.
- **Le trafic IP** : son unité est le gigaoctet, notée Go.

⁴ <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/>

⁵ J. Aslan, K. Mayers, J. G. Koomey and C. France, « Electricity Intensity of Internet Data Transmission - Untangling the Estimates », Journal of Industrial Ecology, Volume 22 numéro 4, 2018, DOI : 10.1111/jiec.12630

Le flux sortant est :

- Les émissions de GES : son unité est le kg équivalent CO₂ ou kg CO₂e.

II.2) Étapes principales de transmission de données sur le backbone de RENATER

Les explications de l'architecture des réseaux de communication sont simplifiées pour que le rapport soit lisible et compréhensible par le plus grand nombre. Le schéma complet de transmission de données est présenté dans la figure 2. Afin de faciliter les calculs et la lecture, nous avons modélisé cette architecture en cinq blocs :

- Le bloc envoi du NR émetteur
- Le bloc réception et envoi du NR passant
- Le bloc amplification signal shelter
- Le bloc réception du NR récepteur.
- Le bloc supervision NOC.

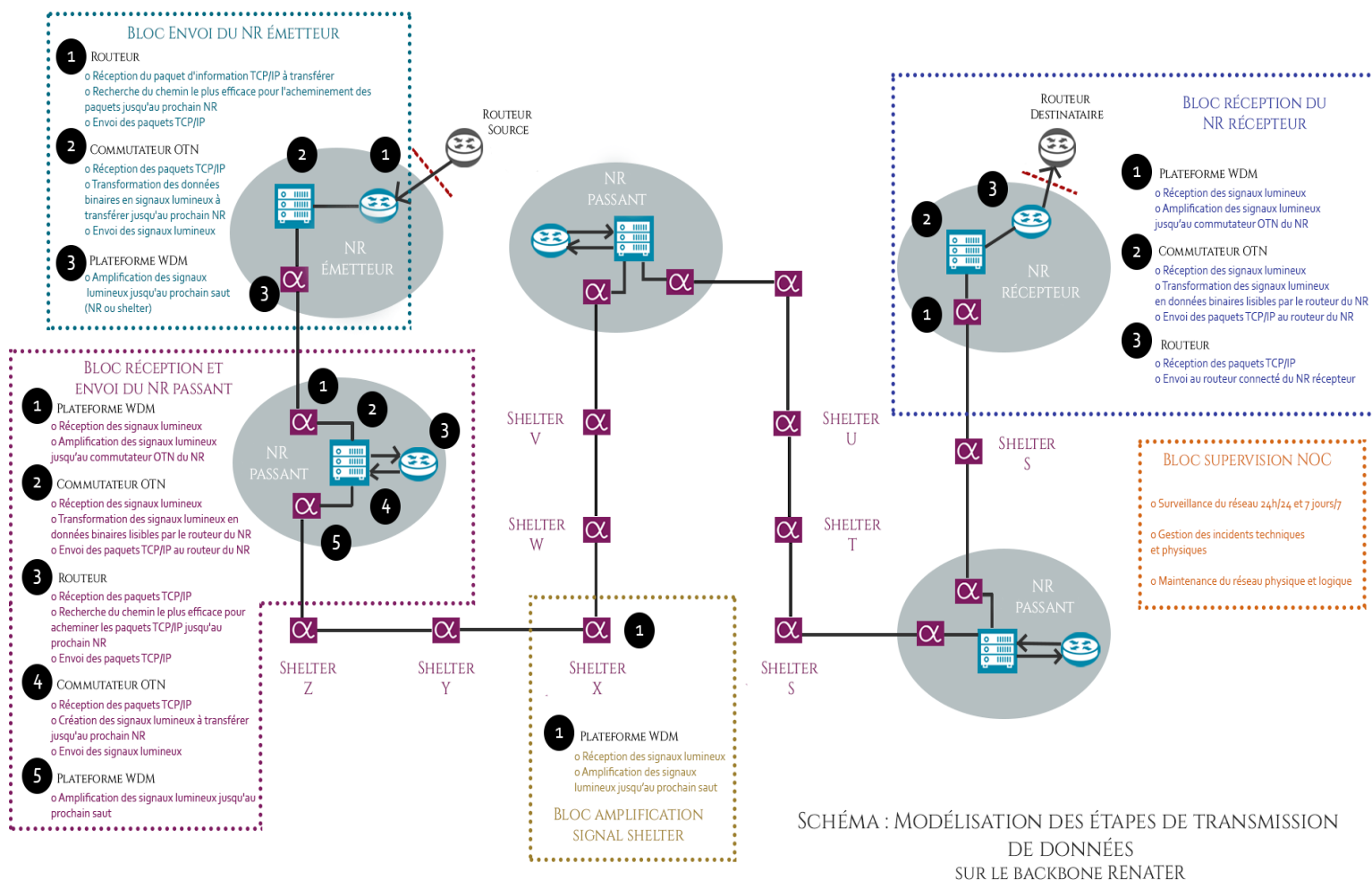


Figure 2 - schéma de modélisation des étapes de la transmission de données

Bloc envoi du NR émetteur

Ce bloc contient les étapes suivantes :

- **Routeur :**
 - o Réception du paquet d'information TCP/IP à transférer en provenance de l'utilisateur

- Recherche du chemin le plus efficace pour l'acheminement des paquets jusqu'au prochain NR
- Envoi des paquets TCP/IP vers le commutateur OTN
- *Commutateur OTN :*
 - Réception du paquet TCP/IP en provenance du routeur
 - Transformation des données binaires en signaux lumineux à transférer jusqu'au prochain NR
 - Envoi des signaux lumineux vers le WDM et contrôle qualité
- *Plateforme de transport optique WDM :*
 - Multiplexage⁶ et amplification des signaux lumineux jusqu'au prochain saut (NR ou shelter)

Bloc réception et envoi du NR passant

Ce bloc contient les étapes suivantes :

- *Plateforme de transport optique WDM :*
 - Réception des signaux lumineux du bloc précédent
 - Amplification des signaux lumineux, démultiplexage et envoi au commutateur OTN du NR
- *Commutateur OTN :*
 - Réception des signaux lumineux du WDM
 - Transformation des signaux lumineux en données binaires lisibles par le routeur du NR
 - Envoi des paquets TCP/IP au routeur du NR
- *Routeur :*
 - Réception du paquet d'information TCP/IP en provenance de l'OTN
 - Recherche du chemin le plus efficace pour l'acheminement du paquet jusqu'au prochain NR
 - Envoi du paquet TCP/IP vers le commutateur OTN
- *Commutateur OTN :*
 - Réception des paquets TCP/IP en provenance du routeur
 - Transformation des données binaires en signaux lumineux à transférer jusqu'au prochain NR
 - Envoi des signaux lumineux vers le WDM et contrôle qualité
- *Plateforme de transport optique WDM :*
 - Multiplexage et amplification des signaux lumineux jusqu'au prochain saut (NR ou shelter)

Bloc amplification signal shelter

Ce bloc contient les étapes suivantes :

- *Plateforme de transport optique WDM :*
 - Réception des signaux lumineux du bloc précédent
 - Amplification des signaux lumineux jusqu'au prochain saut (NR ou shelter)

Bloc réception du NR récepteur

Ce bloc contient les étapes suivantes :

- *Plateforme de transport optique WDM :*
 - Réception des signaux lumineux du bloc précédent
 - Amplification des signaux lumineux, démultiplexage et envoi au commutateur OTN du NR
- *Commutateur OTN :*
 - Réception des signaux lumineux du WDM
 - Transformation des signaux lumineux en données binaires lisibles par le routeur du NR
 - Envoi du paquet TCP/IP au routeur du NR
- *Routeur :*
 - Réception du paquet TCP/IP du commutateur OTN

⁶ Le multiplexage est la capacité à transmettre sur un seul support physique des données de plusieurs équipements.

- Envoi du paquet TCP/IP vers l'utilisateur final

Bloc supervision NOC

Ce bloc contient les étapes suivantes :

- Équipements de supervision :
 - Surveillance et maintenance du réseau physique et logique 24h/24 7jours/7
 - Gestion des incidents physiques et techniques

II.3) Équipements

Plusieurs équipements de transport optique et de routage sont pris en compte dans l'étude. La figure 3 propose une vision schématisée des équipements recensés pour chaque saut, NR ou shelter.

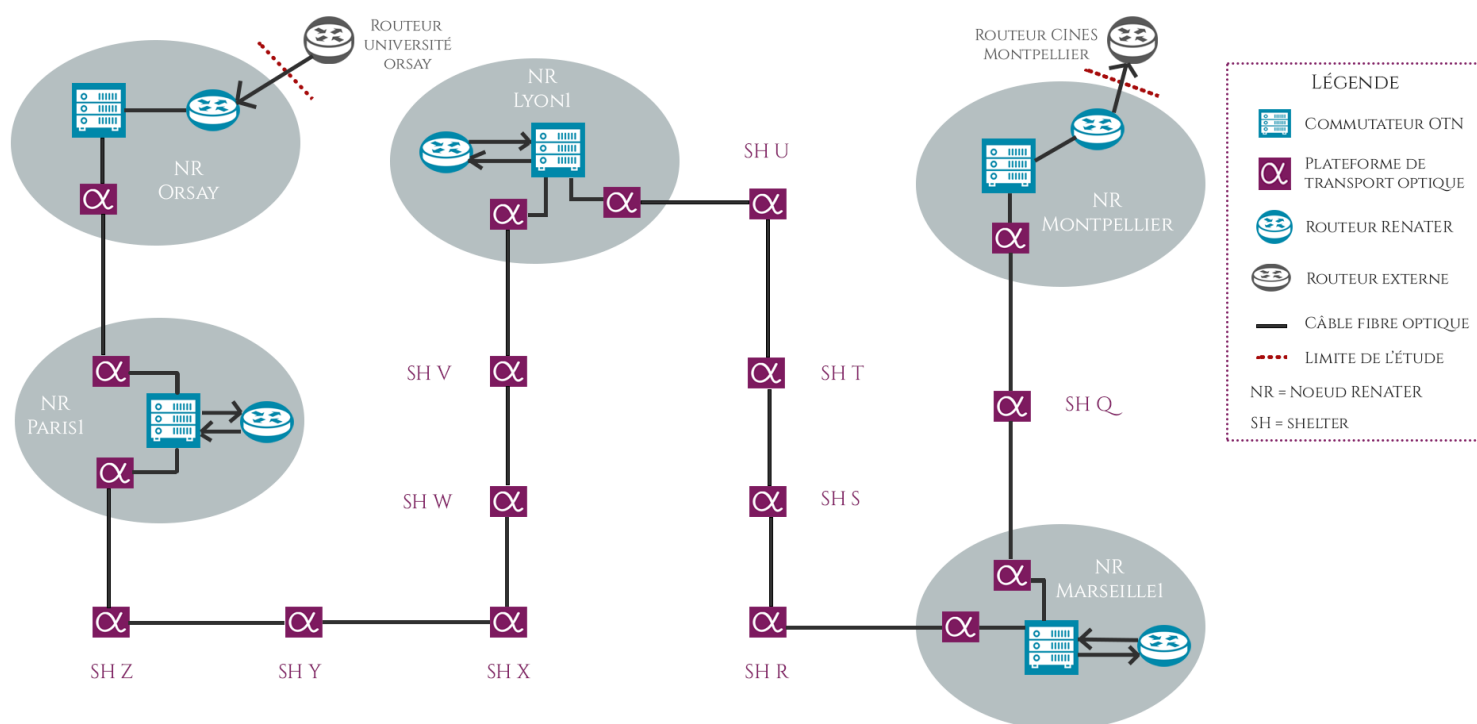


SCHÉMA: TRANSMISSION DE DONNÉES DE L'UNIVERSITÉ D'ORSAY AU CINES MONTPELLIER
CHEMIN SUR LE RÉSEAU RENATER EN 2020
SEGMENT N°1

Figure 3 – transmission de données entre le site d'Orsay et le site de Montpellier

Ci-dessous vont être détaillés les équipements nécessaires à la mise en place du calcul de l'empreinte carbone de la transmission de données au sein de RENATER.

II.3.1) LES ROUTEURS

Les routeurs sont essentiels au fonctionnement des réseaux internet. Leur rôle est de faire transiter des paquets de données d'un réseau à l'autre. Ils possèdent des informations sur leurs plus proches voisins et permettent ainsi de transmettre les données en fonction de l'acheminement visé. La **fonction de routage** traite les adresses IP et les dirige selon l'algorithme de routage et sa table associée. Cette dernière contient la correspondance des adresses réseau avec les interfaces physiques du routeur où sont connectés les autres réseaux.

Pour déterminer les routeurs traversés par les deux cas d'études, un ingénieur Réseau et Télécoms chez RENATER a utilisé la fonction **traceroute**. Cette fonction sert à suivre un paquet de données entre la machine locale et la machine désignée.

Dans notre étude, il y a ainsi deux modèles de routeur de fournisseurs différents :

- Routeur de type Provider Edge de la marque Cisco modèle ASR 9910.
- Routeur de type Provider de la marque Juniper modèle MX2010. Ce sont les routeurs cœurs de réseau.

La durée de vie des équipements de routage est de **10 ans** sur le réseau RENATER. Entre Orsay et Montpellier, sur le backbone de REANTER, 5 routeurs sont traversés :

- 2 routeurs Cisco ASR 9910 avec 2 configurations différentes
- 3 routeurs Juniper MX2010 avec 2 configurations différentes

II.3.2) LES COMMULATEURS OTN

Les commutateurs OTN sont des **équipements de transport optique de haute technologie**. Ils ont de nombreuses fonctions dont les principales sont :

- Agréger les données en provenance des routeurs pour les convertir en signaux lumineux capables de parcourir de grandes distances c'est-à-dire transformer les données binaires des routeurs en signaux lumineux
- La gestion d'interfaces à haute densité, de 1 à 100 Go, allant jusqu'à des longueurs d'onde de 1To
- Le multiplexage en longueur d'onde ou WDM
- La transformation du flux d'information par modulation d'amplitude ou de phase

Les commutateurs OTN de notre étude sont tous identiques. Ils proviennent du fournisseur Infinera et le modèle est le mTera Universal Transport Platform.

Le logiciel de supervision TNMS a été utilisé pour recenser les commutateurs OTN des 2 cas d'étude.

La durée de vie des commutateurs OTN est de **12 ans** sur le réseau RENATER.

Entre Orsay et Montpellier, sur le backbone de RENATER, 5 commutateurs OTN Infinera mTera sont traversés.

II.3.3) LES PLATEFORMES DE TRANSPORT OPTIQUE WDM

Les plateformes de transport optique WDM sont **les passerelles entre les commutateurs OTN et le réseau de câbles de fibre optique**. Elles permettent l'amplification de signal dans deux cas, à la réception dans le NR pour ré-amplifier le signal lumineux jusqu'au commutateur OTN ou pour l'amplification jusqu'au saut suivant.

Dans l'étude, il y a deux modèles du fournisseur Infinera :

- Hit 7300
- Hit 7300 Flatpack

Le logiciel de supervision TNMS a été utilisé pour ces équipements dans les 2 cas d'étude.

La durée de vie des plateformes de transport optique WDM est de **12 ans** sur le réseau RENATER.

Entre Orsay et Montpellier, sur le backbone de RENATER, 18 plateformes de transport optique WDM sont traversées :

- 5 plateformes de transport optique WDM Infinera Hit 7300
- 13 plateformes de transport optique WDM Infinera Hit 7300 Flatpack

II.3.4) LES CÂBLES DE FIBRE OPTIQUE

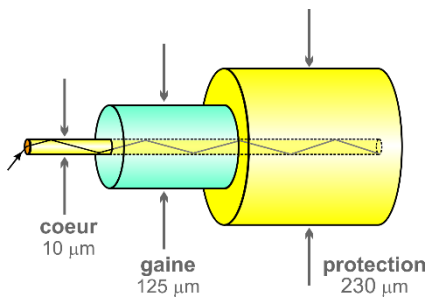


Figure 4 - composition d'une fibre optique - schéma de Christophe Finot

Les câbles de fibre optique contiennent la fibre optique. La **fibre optique** est un guide d'onde qui exploite les propriétés réfractrices de la lumière. Les fibres sont regroupées dans un câble qui peut contenir jusqu'à 6912⁷ fibres. La fibre optique offre une vitesse de transmission d'information quasiment égale à la vitesse de la lumière. La fibre optique est dédiée aux transmissions longue distance et constitue la plupart des artères des réseaux de télécommunications et réseaux locaux à très haut débit.

La fibre optique est constituée d'un fil de verre très fin. Elle comprend un cœur dans lequel se propage la lumière émise par une diode électroluminescente ou une source laser, et une gaine en verre dont l'indice de réfraction garantit que le signal lumineux reste dans la fibre et s'y propage sur plusieurs kilomètres sans perte⁸. La fibre optique est enveloppée d'une couche de protection en plastique.

Les fibres utilisées pour le backbone RENATER sont des fibres monomodes (assurent la propagation d'une seule longueur d'onde dans leur cœur).

Les récents câbles de fibre optique ont une durée de vie de vingt ans minimum s'ils ne subissent pas d'agression physique (celle des rongeurs ou des tractopelles par exemple). Nous avons émis l'hypothèse que la fibre optique a une durée de vie moyenne de **25 ans** pour l'étude.

Il y a **12 000 km de fibre optique** sur le réseau RENATER en France métropolitaine.

II.3.5) LE NOC

NOC est le sigle pour Network Operations Center. **Le NOC sert à l'exploitation et à la supervision de l'ensemble du réseau.** Il est disponible 24h/24 7 jours sur 7. Le NOC est un service dédié aux incidents et aux interventions.

Les équipements du NOC sont, d'une part, les équipements des équipes dédiées à 100% à la gestion du réseau RENATER, et d'autre part, les équipements utilisés uniquement à la résilience du réseau et à la supervision (routeurs et serveur).

Il y a un **routeur Out Of Band (Oob)** par NR permettant l'accès aux équipements en out of band, en cas d'indisponibilité des liens in-band. Il existe différents modèles de routeurs Cisco Oob. Nous n'avons pas été en mesure de recenser la part des modèles de routeurs Oob sur le réseau. Ainsi, nous avons choisi un seul modèle de routeurs pour les routeurs du NOC, le routeur Cisco 3640. Nous avons également choisi de lui procurer une durée de vie égale aux équipements de routage de RENATER. Il y a donc **72 routeurs Cisco Oob 3640 d'une durée de vie de 10 ans.**

Le plateau technique recense **13 PC fixes avec écrans** et **4 écrans** pour la supervision du réseau. Il y a également **1 PC portable**. Il n'a pas été possible de récupérer les modèles exacts des PC et des écrans du NOC.

Deux VM hébergent le logiciel de supervision TNMS.

II.3.5) TABLEAU RÉSUMÉ DES ÉQUIPEMENTS

Le tableau 1 résume les équipements par segment et les équipements du NOC.

⁷ https://www.fujikura.co.jp/eng/products/optical/opticalfibers/02/2053715_12898.html

⁸ « Architecture des réseaux », Dromard D., SERET D., p 9

Nom équipement	Segment Orsay-Montpellier	NOC
Routeur Cisco ASR9910 (2 configurations)	2	
Routeur Juniper MX2010 (2 configurations)	3	
Routeur Cisco 3640		72
Commutateur OTN Infinera mTera	5	
Plateforme de transport optique WDM Infinera Hit7300	5	
Plateforme de transport optique WDM Infinera Hit7300 Flatpack	12	
PC fixe		13
PC portable		1
Écran		17
Serveur		1

Tableau 1 - résumé des équipements de l'étude par segment

II.4) Modèle de calcul des émissions de GES pour la transmission d'un Go

Résultat attendu : la transmission d'1 Go entre l'université d'Orsay et le CINES Montpellier correspond à l'émission de x kg équivalent CO₂.

II.4.1) PRINCIPE GÉNÉRAL DU CALCUL DES ÉMISSIONS DE GES POUR UN GIGAOCTET

Les émissions de GES générées par le transport d'un gigaoctet sur le réseau résultent :

1. Des GES générés par la production et le transport de l'électricité utilisée lors de l'utilisation des équipements traversés
2. De la part des GES générés par la fabrication (production et transport) des équipements traversés
3. De la part des GES générés par le centre de supervision des réseaux (NOC), en partie liés à l'utilisation et à la fabrication des équipements de supervision
4. De la part des GES générés par la fabrication, la distribution, l'installation et l'utilisation de la fibre optique de l'ensemble du réseau

Pour rappel, la transmission d'un gigaoctet d'un point A à un point B a été modélisée en blocs étapes.

Le principe général des émissions de GES d'un gigaoctet transporté sur le réseau est présenté ci-dessous :

$$\begin{aligned}
 & \text{Emissions de GES totales pour la transmission d'1 Go en kgCO}_2\text{e/Go} \\
 &= \sum_{\text{blocs}} \text{émissions émises par la fabrication et l'utilisation des équipements de chaque bloc} \\
 & \quad \text{de la transmission de ce Go en kgCO}_2\text{e/Go} \\
 & + \text{part du NOC en kgCO}_2\text{e/Go} + \text{part de la fibre optique en kgCO}_2\text{e/Go}
 \end{aligned}$$

Nous allons ensuite préciser les étapes de calcul de la part de chaque bloc, du NOC et de la fibre optique.

II.4.2) CALCUL D'ÉMISSIONS CO2E DES BLOCS

Pour chaque bloc, les émissions de GES sont calculées à partir des émissions de GES liées à l'utilisation des équipements et à leur fabrication.

II.4.2.1) CALCUL DES ÉMISSIONS CO2E LIÉES À L'UTILISATION DES ÉQUIPEMENTS

Le but de cette étape est de rassembler toutes les données liées à l'usage d'un équipement, en incluant sa consommation électrique, le trafic transitant par celui-ci et le PUE du site de l'équipement. Il faut utiliser des données d'une même période. Ici ce sont des mesures directes sur une journée, soit 24h.

Voici la formule du calcul des émissions CO2e liées à l'utilisation d'un équipement, que ce soit un routeur, un commutateur OTN ou une plateforme de transport optique WDM :

$$\text{Émissions CO2e liées à l'utilisation d'un équipement en kgCO2e/Go} = \frac{\text{consommation électrique de l'équipement en kWh}}{\text{trafic IP transitant sur l'équipement en Go}} \times \text{PUE} \times \text{FE en kgCO2e/kWh}$$

Où :

- Les données sont mesurées sur une même unité de temps.
- FE est la constante du facteur d'émission correspondant aux GES générés par la consommation d'1 kWh d'électricité en France. Il correspond à 0,108 kgCO₂/kWh (valeur ELCD).
- PUE = 1,8.

II.4.2.2) CALCUL DES ÉMISSIONS CO2E LIÉES À LA FABRICATION DES ÉQUIPEMENTS

Les émissions de GES liées à la fabrication des équipements incluent l'extraction des matières premières, la transformation des matières premières, la production à l'usine, le transport entre chaque point de la chaîne de fabrication, etc. Les émissions de GES liées au transport incluent le transport entre l'usine de production et la livraison en France. Ces deux valeurs d'émissions CO2e sont fournies par les fournisseurs d'équipements ou extrapolées.

Pour chaque équipement, on connaît :

- Ses émissions CO2e de production en kg CO2e
- Ses émissions CO2e de transport en kg CO2e
- Sa durée de vie en années
- La quantité de données transférées sur cet équipement sur un an en Go

Pour rappel, on émet l'hypothèse que le trafic sur chaque équipement est constant au cours de ses années d'utilisation. On peut donc utiliser cette valeur de référence pour calculer le trafic total de données ayant transité sur l'équipement tout au long de sa vie.

Voici les étapes de calculs :

Pour chaque équipement, on calcule la quantité totale de données ayant transité sur l'équipement au cours de sa vie :

$$\begin{aligned} \text{Quantité totale trafic équipement en Go} \\ &= \text{Quantité de données transférées sur l'équipement en 1 an en Go} \\ &\times \text{durée de vie en années} \end{aligned}$$

On déduit la part de production de l'équipement attribuée :

$$\text{Part production en kg CO2e/Go} = \frac{\text{émissions CO2e liées à la production de l'équipement en kgCO2e}}{\text{Quantité totale trafic équipement en Go}}$$

On reproduit le même calcul pour la part liée au transport de l'équipement :

$$\text{Part transport en kgCO}_2\text{e/Go} = \frac{\text{émissions CO}_2\text{e liées au transport de l'équipement en kgCO}_2\text{e}}{\text{Quantité totale trafic équipement en Go}}$$

On peut finalement calculer les émissions totales CO₂e liées à la fabrication des équipements pour 1 Go :

$$\begin{aligned} & \text{Émissions CO}_2\text{e liées à la fabrication de l'équipement en kgCO}_2\text{e/Go} \\ & = \text{Part de la production en kgCO}_2\text{e/Go} + \text{part du transport en kgCO}_2\text{e/Go} \end{aligned}$$

II.4.2.3) CALCUL FINAL DES ÉMISSIONS CO₂E D'UN BLOC

Pour finir le calcul des émissions CO₂e d'un bloc, on additionne les émissions CO₂e liées à l'utilisation et à la fabrication de chaque équipement du bloc :

$$\begin{aligned} & \text{Émissions CO}_2\text{e d'un bloc pour 1 Go en kgCO}_2\text{e/Go} \\ = & \sum_{\text{équipements}} \text{émissions CO}_2\text{e(utilisation + fabrication) par équipement en kgCO}_2\text{e/Go} \end{aligned}$$

II.4.3) CALCUL DE LA PART DE SUPERVISION DU NOC

Le NOC n'intervient pas directement dans la transmission mais maintient l'ensemble des équipements du réseau (backbone). Nous le modélisons sous forme de bloc supervision. Les émissions de GES du NOC sont en partie liées à l'utilisation et à la fabrication des équipements de supervision.

Pour ce calcul, nous travaillons avec des données sur une période d'un an.

Pour la supervision du NOC, les données nécessaires sont :

- Le total des données ayant transité sur le réseau RENATER en Go par an.
- L'ensemble des équipements de supervision du NOC, notamment les équipements des équipes dédiées à RENATER ainsi que les routeurs Oob en service sur chaque NR. Les données recherchées sont le type d'équipement, la durée de vie des équipements, la consommation électrique des équipements par an et les émissions CO₂e liées à la fabrication des équipements.

Voici les étapes pour calculer la part du Go liée aux équipements de supervision du NOC :

Dans un premier temps, on calcule la part liée à la consommation électrique des équipements de supervision du NOC sur un an :

$$\begin{aligned} & \text{Part utilisation NOC en kgCO}_2\text{/Go} \\ = & \frac{\text{Consommation électrique des équipements du NOC sur 1 an en kWh} \times \text{PUE} \times \text{FE en kgCO}_2\text{e}}{\text{Quantité totale de données ayant transité sur le réseau par an en Go}} \end{aligned}$$

Où :

- FE = 0,108 kg CO₂e/kWh.

- PUE = 1,8.

Puis, on calcule la part liée à la fabrication des équipements du NOC :

Pour rappel, nous émettons l'hypothèse que le trafic est constant au cours des années sur le réseau RENATER.

$$\begin{aligned} & \text{Part}_{\text{fabrication}} \text{ NOC en kgCO}_2\text{e/Go} \\ = & \sum_{\text{équipements}} \frac{\text{émissions CO}_2\text{e fabrication (production + transport) en kgCO}_2\text{e}}{\text{Quantité de données sur le réseau par an} \times \text{durée de vie de l'équipement en années}} \end{aligned}$$

Pour calculer la part du NOC de ce Go, on additionne les deux parts précédentes.

$$\text{Part du NOC en kgCO}_2\text{/Go} = \text{Part liée à l'utilisation du NOC en kgCO}_2\text{/Go} + \text{Part liée à la fabrication du NOC en kgCO}_2\text{/Go}$$

II.4.4) CALCUL DE LA PART DE LA FIBRE OPTIQUE

Cette étape permet de calculer la part de la fibre optique pour un gigaoctet de données transférées.

Le facteur d'émission de la fibre optique utilisé provient d'une ACV⁹ produite par l'entreprise ACOME, un des fournisseurs de câble des prestataires de RENATER. L'ACV prend en compte la fabrication, la distribution, l'installation (fin de vie des emballages et prise en compte des chutes lors de l'installation), l'utilisation et la fin de vie de la fibre optique. Pour le potentiel de réchauffement climatique, la valeur est de 1,27 kg CO₂/m de câble de 96 fibres en France soit 1270 kgCO₂/km. Or RENATER travaille avec une paire de fibres sur le réseau, nous divisons donc 1270 par 48, ce qui fait un facteur d'émission de la fibre de 26,45 kg CO₂/km.

Pour rappel, nous émettons l'hypothèse que le trafic est constant au cours des années sur le réseau RENATER.

$$\text{Part de la fibre optique en kgCO}_2\text{/Go} = \frac{\text{Nombre total de km de fibre sur le réseau} \times \text{facteur d'émission de la fibre en kgCO}_2\text{/km}}{\text{Quantité de données sur le réseau en un an en Go} \times \text{durée de vie en années}}$$

Toutes ces étapes permettent de calculer les émissions de GES pour un Go de données transférées, en reprenant la formule énoncée dans la première partie du calcul d'émissions (partie II.2.4.1).

II.5) Bloc envoi du NR émetteur

Le **NR émetteur** est directement relié à l'établissement envoyant les données. Il recense 1 routeur, 1 commutateur OTN et 1 plateforme de transport optique WDM sur les deux segments.

La consommation électrique et le trafic IP par équipement proviennent de **mesures directes**.

II.6) Bloc réception et envoi du NR passant

Le **NR passant** est un NR de transition entre le NR émetteur et le NR récepteur. Il recense 1 routeur, 1 commutateur OTN et 2 plateformes de transport optique.

La consommation électrique et le trafic IP par équipement proviennent de **mesures directes**.

II.7) Bloc amplification signal shelter

Le **shelter** sert à la régénération des signaux lumineux. Il est composé d'une unique plateforme de transport optique WDM.

Il n'a pas été possible de récupérer la consommation électrique par mesure directe sur les équipements localisés dans les shelters. **Nous avons calculé la consommation électrique** moyenne par plateforme de transport optique WDM. Ces calculs sont expliqués dans la partie II.2.10.3.

Shelters entre NR Paris1 et NR Lyon1 (segment 1) : exemple de données

Équipement	Consommation électrique en KWh – jour plein (23/06/20)	Trafic IP en Go – jour plein (23/06/20)	Durée de vie en année	Impact de production en kg CO ₂ e	Impact de transport en kg CO ₂ e	Trafic IP en Go sur une année (16/06/19 au 16/06/20)

⁹ ACV Acome de 2017 : Profil Environnemental Produit (PEP). Référence fibre optique : Ng277 Câble compacts tubes 96FO M12

WDM Hit7300 Flatpack (configuration 1)	2,7*	46387	12	2796*	215*	17340000
WDM Hit7300 Flatpack (configuration 2)	4,2*	46387	12	2796**	215**	17340000

Tableau 2 - exemple de données bloc amplification signal shelter

*Données extrapolées, calcul expliqué dans la partie II.11.

II.8) Bloc réception du NR récepteur

Le **NR récepteur** est directement relié à l'établissement destinataire des données. Il recense 1 routeur, 1 commutateur OTN et 1 plateforme de transport optique WDM sur les deux segments.

La consommation électrique et le trafic IP par équipement proviennent de **mesures directes**.

II.9) Bloc supervision NOC

Le bloc **supervision NOC** supervise l'ensemble du réseau, il est donc nécessaire de connaître la quantité de données qui y transite sur une période donnée. Nous avons choisi de faire les calculs en prenant en compte les valeurs de consommations électriques des équipements et de trafics sur une année. Le service métrologie peut fournir la quantité de données transitant sur le réseau RENATER durant une année. Elle était de 490 Po (en 2019) soit **490 000 000 Go**.

Il y a deux types d'équipements :

1. Les équipements installés sur le réseau (72 routeurs Oob + 2 VM)
2. Les équipements du plateau technique (ordinateurs des équipes + ordinateurs de supervision + écrans)

Nom équipement	Nombre	Durée utilisation en h/jour	Consommation électrique sur une année en kWh	Durée de vie en années	Impact de fabrication en kg CO2e
Équipements sur le réseau					
Routeur Cisco 3640	72	24	66225,6*	10	12960*
VM	2	24	37,4	10	32,5
Totaux équipements réseau	74		66263		12992,5
Équipements du plateau technique					
Ordinateur	7	8	650**	3	
Ordinateur	4	8	275**	3	
Ordinateur	2	24	1125**	3	
Écrans	4	24	900**	3	
Ordinateur portable	1	8	48***	3	
Totaux équipements plateau	18		2998		3807*** Ce chiffre est en kg CO2e/an

Tableau 3 - données bloc supervision NOC

*Données fournies directement par le fournisseur Cisco.

**Données fournies directement par le NOC.

***Données provenant d'EcoDiag (ecodiag.ecoinfo.cnrs.fr).

Afin de calculer la part des 2 VM où sont installées le logiciel de supervision, nous avons comptabilisé l'ensemble des serveurs RENATER utilisés pour les VM de RENATER. Sur RENATER, il y a 2 serveurs Dell Power Edge R630 et 8 serveurs Dell Power Edge R640. 800 VM utilisent ces 10 serveurs. L'objectif est de calculer la part des 2 VM sur ces 10 serveurs.

Le tableau 4 présente les données utilisées pour le calcul d'impact de consommation des VM du NOC :

Équipement	% fabrication	% transport	Émissions liées à la fabrication en kg CO2e	Émissions liées au transport en kg CO2e	Émissions totales en kg CO2e	Conso électrique en kWh/an
Dell Servers Edge R630	17,4	0,3	1263,24	21,78	7260*	1760,3
Dell Servers Edge R640	16,6	0,3	1283,18	23,19	7730*	1433,574
Total des 10 serveurs			12791,92	229,08		14989,192
Pour 2 VM sur 800 VM			31,9798	0,5727		37,47298

Tableau 4 - données pour calcul pour les VM

* Données fournies par les résultats d'ACV du fournisseur Dell.

II.10) Part de la fibre optique

La **fibre optique** permet d'acheminer les données d'un point à un autre. Les données recueillies sont visibles dans le tableau 5 ci-dessous :

Quantité de données par an en Go sur le réseau	490 000 000
Nombre de km de câbles de fibre optique sur le réseau	12 000
Durée de vie en années	25
Facteur émission de la fibre en kg CO2e/km	26,45 *

Tableau 5 - données pour calcul part de la fibre optique

* Données provenant du fabricant de fibre optique ACOME. ACOME fournit une ACV pour des câbles de 96 fibres optiques. Or, RENATER exploite seulement une paire de fibres sur ce câble. Nous divisons le facteur d'émission initial par 48 pour obtenir l'impact de la paire de fibres sur le réseau.

II.11) Détails des calculs d'extrapolation

Plusieurs extrapolations ont été réalisées afin de calculer les valeurs d'impact de fabrication, incluant la production et le transport, des équipements de routage et de transport optique.

II.11.1) ÉMISSIONS CO2E LIÉES AU TRANSPORT DES ROUTEURS JUNIPER MX2010

L'équipementier Juniper nous a fourni des données sur l'impact de production (en kg CO2e) de ses composants des routeurs MX2010. Nous avons ainsi calculé l'impact de production en fonction des configurations de chaque routeur des segments. Afin de calculer les émissions CO2e liées au transport de ces routeurs, nous avons utilisé les résultats d'ACV de l'équipementier Cisco. Nous avons opté pour la catégorie « Large chassis router ».

Dans cette catégorie, les résultats d'ACV sont :

- 93% des émissions CO2e d'un routeur sont liées à son utilisation.
- 4% des émissions CO2e d'un routeur sont liées à sa production.
- 3,2% des émissions CO2e d'un routeur sont liées au transport.
- -0,2% des émissions CO2e d'un routeur sont liées à la fin de vie.

-Étape 1 : émissions CO2e totales du routeur-

Pour obtenir les émissions CO2e liées au transport du routeur, nous allons d'abord calculer les émissions CO2e totales du routeur en kg CO2e à partir de l'impact de production.

L'impact de production pour la configuration 1 est de 2 549 kg CO2e et pour la configuration 2 de 2265 kg CO2e.

Les émissions CO2e totales du routeur au cours de son cycle de vie sont :

$$\text{Émissions CO2e totales en kg CO2e} = \frac{\text{émissions liées à la production en kg CO2e}}{\text{part liée à la production en \%}}$$

Le résultat des émissions CO2e totales du routeur MX2010 pour la configuration 1 sont de **63 725 kg CO2e** et de **56 625 kg CO2e** pour la configuration 2.

-Étape 2 : calcul des émissions CO2e liées au transport-

Les émissions CO2e liées au transport sont :

$$\begin{aligned} \text{Émissions CO2e liées au transport en kg CO2e} \\ = \text{émissions CO2e totales en kg CO2e} \times \text{part liée au transport en \%} \end{aligned}$$

Les émissions CO2e liées au transport sont ainsi de **2 039 kg CO2e** pour la configuration 1 et de **1 812 kg CO2e** pour la configuration 2.

II.11.2) ÉMISSIONS CO2E LIÉES À LA FABRICATION DES ÉQUIPEMENTS DE TRANSPORT OPTIQUE INFINERA

Nous avons utilisé des résultats d'une ACV réalisée par l'entreprise ADVA dans son rapport « sustainability report 2017 ». L'équipementier ADVA a produit une ACV sur son produit FSP 3000 Cloud Connect. Cet équipement est similaire aux plateformes de transport optique WDM Hit7300 et Hit7300 Flatpack d'Infinera.

N'ayant pas d'ACV pour les équipements Infinera, nous avons également utilisé ces résultats d'ACV pour calculer les émissions CO2e des commutateurs OTN mTera d'Infinera.

N'ayant pas les pourcentages exacts des résultats d'ACV, nous avons mesuré la part des étapes de l'équipement à l'aide d'une règle sur l'écran. De cette manière, nous avons déduit par la part des émissions CO2e liées à cycle de vie du produit.

Les résultats d'ACV obtenus sont :

- 86,4% des émissions de CO2e de l'équipement sont liées à son utilisation.
- 10,4% des émissions de CO2e de l'équipement sont liées à sa production.
- 0,8% des émissions de CO2e de l'équipement sont liées au transport.

- 2,4% des émissions de CO₂e de l'équipement sont liées au support.

Dans le rapport, ADVA fournit le facteur d'émission électrique utilisé qui est de : 0,433 kg CO₂e/kWh et la durée de vie des équipements de 7 ans.

Cette fois-ci, nous avons utilisé le volume comme élément de comparaison pour calculer les émissions CO₂e des équipements Infinera.

Le calcul des émissions CO₂e a été réalisé en 4 étapes.

-Étape 1 : consommation électrique totale de l'équipement ADVA de référence –

Nous avons utilisé la puissance typique de l'équipement ADVA de 1 035 W pour calculer la consommation électrique totale de l'équipement.

La consommation électrique totale de l'équipement sur toute sa durée de vie est égale à :

$$\begin{aligned} \text{Consommation électrique totale en kWh} \\ = \text{puissance en W} \times \text{durée de vie en années} \times 24 \times 365 / 1000 \end{aligned}$$

(24 est le nombre d'heures dans une journée et 365 le nombre de jours dans une année)

Celle-ci est de **63 466,2 kWh** sur toute sa durée de vie.

-Étape 2 : émissions CO₂e totales de l'équipement ADVA de référence –

Les émissions CO₂e totales générées par l'utilisation sont :

$$\begin{aligned} \text{Émissions CO}_2\text{e totales en kg CO}_2\text{e liées à l'utilisation} \\ = \text{consommation électrique totale en kWh} \\ \times \text{facteur d'émission électrique en kg CO}_2\text{e/kWh} \end{aligned}$$

Les émissions CO₂e totales générées par l'utilisation de l'équipement ADVA sont égales à 27 480,9 kg CO₂e.

Les émissions CO₂e totales de l'équipement sont :

$$\text{Émissions CO}_2\text{e totales en kg CO}_2\text{e} = \frac{\text{émissions liées à l'utilisation en kg CO}_2\text{e}}{\text{part liée à l'utilisation en \%}}$$

Les émissions CO₂e totales de l'équipement ADVA sont de **31 806,6 kg CO₂e**.

-Étape 3 : émissions CO₂e de l'équipement ADVA de référence liées à la production et au transport-

Les émissions CO₂e liées à la production sont :

$$\begin{aligned} \text{Émissions CO}_2\text{e liées à la production en kg CO}_2\text{e} \\ = \text{émissions CO}_2\text{e totales en kg CO}_2\text{e} \times \text{part liée à la production en \%} \end{aligned}$$

Les émissions CO₂e liées à la production sont ainsi de **3 307,9 kg CO₂e**.

Les émissions CO₂e liées au transport sont :

$$\begin{aligned} \text{Émissions CO}_2\text{e liées au transport en kg CO}_2\text{e} \\ = \text{émissions CO}_2\text{e totales en kg CO}_2\text{e} \times \text{part liée au transport en \%} \end{aligned}$$

Les émissions CO₂e liées au transport sont ainsi de **254,5 kg CO₂e**.

-Étape 4 : émissions CO₂e liées à la production et au transport des équipements Infinera –

Nous utilisons le volume de l'équipement ADVA comme élément de comparaison, que nous avons calculé à partir des informations trouvées sur la fiche technique de l'équipement FSP 3000 Cloud Connect.

Le volume de l'équipement ADVA est de 41 285 160 mm³. Grâce aux calculs précédents, nous estimons que pour ce volume donné, 3 307,9 kg CO_{2e} sont émis par la fabrication de l'équipement et 254,5 kg CO_{2e} sont émis par le transport de l'équipement.

Pour calculer les émissions CO_{2e} liées à la fabrication d'un équipement Infinera :

$$= \frac{\text{Émissions CO}_2\text{e liées à la production d'un équipement Infinera en kg CO}_2\text{e}}{\text{Volume de l'équipement ADVA en m}^3} = \frac{(\text{émissions CO}_2\text{e liées à la production équipement ADVA en kg CO}_2\text{e} \times \text{volume de l'équipement Infinera en m}^3)}{\text{Volume de l'équipement ADVA en m}^3}$$

Pour calculer les émissions CO_{2e} liées au transport d'un équipement Infinera :

$$= \frac{\text{Émissions CO}_2\text{e liées au transport d'un équipement Infinera en kg CO}_2\text{e}}{\text{Volume de l'équipement ADVA en m}^3} = \frac{(\text{émissions CO}_2\text{e liées au transport équipement ADVA en kg CO}_2\text{e} \times \text{volume de l'équipement Infinera en m}^3)}{\text{Volume de l'équipement ADVA en m}^3}$$

Nous avons calculé les volumes pour les trois équipements Infinera à partir des fiches techniques des équipements respectifs. Les résultats des émissions CO_{2e} pour les équipements Infinera sont visibles dans le tableau 6 ci-dessous :

Équipement Infinera	Volume en mm ³	Émissions CO _{2e} liées à la production en kg CO _{2e}	Émissions CO _{2e} liées au transport en kg CO _{2e}
Hit7300	77 231 700	6 188	476
Hit7300 Flatpack	34 908 750	2 796	215
mTera	160 167 637,5	12 833	987

Tableau 6 - résultats d'émissions CO_{2e} pour les équipements Infinera

II.II.3) CONSOMMATION ÉLECTRIQUE DES PLATEFORMES DE TRANSPORT OPTIQUE WDM DES SHELTERS

D'après le logiciel Optiperf (interne au GIP RENATER), il existe deux configurations de plateformes de transport optique WDM présentes sur le réseau.

Pour calculer la consommation électrique moyenne quotidienne sur ces équipements, il faut faire :

$$\text{Consommation électrique quotidienne en kWh} = \text{Puissance max en W} \times \text{consommation électrique max en \%} \times 24 / 1000$$

(La consommation électrique maximale en % correspond à la consommation d'utilisation maximale de l'équipement)

(24 est le nombre d'heures en une journée)

Les résultats obtenus sont exposés dans le tableau 7 :

Configuration WDM	Puissance max en W	Consommation électrique max en %	Consommation électrique en kWh sur une journée
Configuration 1	530	21%	2,6712
Configuration 2	530	33%	4,1976

Tableau 7 - résultats calculs consommation électrique WDM shelters

II.12) Vérification des données

Nous avons essayé de valider les chiffres obtenus pour chaque type de données.

Trafic IP

Les données de trafic IP ont été vérifiées avec un ingénieur Métrologie chez RENATER. Les mesures directes de quantité de trafic annuel proviennent de scripts qu'il a développés.

Les autres mesures directes de trafic IP proviennent d'un projet de mesures directes internes. Ces données sont toujours inférieures aux données de MetroDB¹⁰ de 4 à 8%.

Après investigation et vérification des codes sources avec 2 ingénieurs, cette marge a été validée autant du côté de RENATER que d'EcolInfo pour continuer le projet et utiliser les données traitées de MESDIR.

Consommation électrique

Plusieurs journées de tests sur les données du projet MESDIR ont confirmé que les consommations électriques des équipements sont stables (quel que soit le trafic). Elles dépendent des cartes et modules installées sur les équipements.

Par ailleurs, nous avons vérifié que les puissances en W recueillies par les mesures directes correspondent aux informations sur les fiches techniques des équipements.

Impact de fabrication

Deux équipementiers nous ont fourni des données sur l'impact de fabrication de leurs produits. Les données calculées ont été vérifiées avec les résultats d'ACV d'autres équipementiers. Nos chiffres sont cohérents avec la littérature.

Nous n'avons cependant pas obtenu d'information sur les équipements de transport optique.

Intensité énergétique

Les articles sur l'intensité énergétique d'internet proposent des intensités énergétiques allant de 0,004 à 136 kWh/Go^{11 12 13}.

Pour les jours creux, nos résultats de calculs sur les mesures directes amènent à une intensité énergétique de 0,004 à 0,007 kWh/Go. Pour les jours pleins, l'intensité énergétique calculée est entre 0,002 et 0,004 kWh/Go.

Les résultats d'intensité énergétique sont dans la tranche basse des résultats de la littérature. Ceci permet de valider nos calculs.

¹⁰ Base de données interne pour la métrologie

¹¹ Vlad C. Coroama, Lorenz M. Hilty, Ernst Heiri, and Frank M. Horn, « The Direct Energy Demand of Internet », *Journal of Industrial Ecology*, Volume 17 numéro 5, 2013, DOI : 10.1111/jiec.12048

¹² J. Aslan, K. Mayers, J. G. Koomey and C. France, « Electricity Intensity of Internet Data Transmission - Untangling the Estimates », *Journal of Industrial Ecology*, Volume 22 numéro 4, 2017, DOI : 10.1111/jiec.12630

¹³ L. Krug, M. Shackelton, F. Saffre, « Understanding the Environmental costs of fixed line networking », *e-Energy'14* June 11, 2014, <http://dx.doi.org/10.1145/2602044.2602057>

III) Évaluation de l'empreinte carbone

Cette partie est dédiée à l'évaluation de l'empreinte carbone de notre unité fonctionnelle.

III.1) Évaluation de l'empreinte carbone des blocs

Cette partie va détailler les calculs pour évaluer l'empreinte carbone du bloc NR Orsay ou bloc envoi NR émetteur. C'est l'application des calculs définis dans le modèle de calcul des émissions de GES pour un Go, dans la partie précédente II.2.4.2.

Nous détaillons le calcul pour le **routeur ren-nr-orsay-rtr**. Les autres équipements suivent le même principe de calcul.

Émissions CO_{2e} liées à l'utilisation d'un Go par équipement :

L'intensité énergétique d'un équipement est obtenue par le rapport des mesures sur une même période (1 jour=24h ici) de la consommation électrique (en kWh) et du trafic IP en (Go).

Consommation électrique en kWh – jour plein (23/06/20)	Trafic IP en Go – jour plein (23/06/20)	Intensité énergétique kWh/Go
63,39	172 165,5	0,000368192

Pour obtenir les émissions CO_{2e} liées à l'utilisation de l'équipement sur la journée, nous multiplions l'intensité énergétique calculée ci-dessus par le PUE et le facteur d'émission d'électricité français (en kg CO_{2e}/kWh).

Émissions CO_{2e} d'1 Go liées à l'utilisation de ren-nr-orsay-rtr

= Intensité énergétique en kWh/Go * PUE * FE en kg CO_{2e}/kWh

= 0,000368192 x 1,8 x 0,108

= **7,15766E-05 kg CO_{2e}/Go**

Émissions CO_{2e} liées à la fabrication de l'équipement :

Pour évaluer les émissions CO_{2e} d'un Go liées à la fabrication de l'équipement, il faut diviser les émissions liées à la fabrication de l'équipement (production + transport) par le nombre de gigaoctets qui a transité par l'équipement au cours de sa vie.

Trafic IP sur 1 an en Go (16/06/19 au 16/06/20)	Impact production en kg CO _{2e}	Impact transport en kg CO _{2e}	Durée de vie en années
60 700 000	4 209	3 366	10

$$\begin{aligned} & \text{Émissions CO}_2\text{e d'1 Go liées à la fabrication de ren-nr-orsay-rtr} \\ & = \frac{(\text{Impact production en kg CO}_2\text{e} + \text{impact transport en kg CO}_2\text{e})}{\text{trafic IP sur 1 an en Go} * \text{durée de vie en années}} \\ & = (4209 + 3366) / (60700000 \times 10) \\ & = 1,24794\text{E-}05 \text{ kg CO}_2\text{e/Go} \end{aligned}$$

Émissions CO₂e totales d'un Go par équipement :

Par équipement, il faut additionner les émissions liées à la fabrication et à l'utilisation.

$$\begin{aligned} & \text{Émissions CO}_2\text{e d'1 Go de ren-nr-orsay-rtr} \\ & = \text{Émissions CO}_2\text{e d'1 Go liées à l'utilisation en kg CO}_2\text{e} \\ & \quad + \text{émissions CO}_2\text{e d'1 Go liées à la fabrication en kg CO}_2\text{e} \\ & = 7,15766\text{E-}05 + 1,24794\text{E-}05 \\ & = 8,4056\text{E-}05 \text{ kg CO}_2\text{e/Go} \end{aligned}$$

Nous procédons à ces étapes de calcul pour chaque équipement du NR. Voici les résultats :

NR	Équipement	Émissions fabrication en kg CO ₂ e/Go	Émissions utilisation jour plein en kg CO ₂ e/Go	Émissions totales CO ₂ e en kg CO ₂ e/Go
NR Orsay	ren-nr-orsay-rtr	1,24794E-05	7,15766E-05	8,4056E-05
	orsay-otn	1,89731E-05	7,17911E-05	9,07642E-05
	ren-nr-orsay-wdm	7,99989E-06	1,20903E-05	2,00902E-05
Émissions totales CO₂e bloc en kgCO₂e/Go				0,00019491

Pour obtenir les émissions CO₂e du NR pour 1 Go, il faut additionner les émissions CO₂e d'1Go pour chaque équipement présent sur le NR.

$$\begin{aligned} & \text{Émissions CO}_2\text{e d'1 Go pour NR Orsay} \\ & = \text{Émissions CO}_2\text{e d'1 Go pour ren-nr-orsay-rtr} \\ & \quad + \text{émissions CO}_2\text{e d'1 pour orsay-otn} \\ & \quad + \text{émissions CO}_2\text{e d'1 pour ren-nr-orsay-wdm} \\ & = 8,4056\text{E-}05 + 9,07642\text{E-}05 + 2,00902\text{E-}05 \\ & = 0,00019491 \text{ kg CO}_2\text{e/Go} \end{aligned}$$

Ces calculs ont été faits pour tous les équipements de l'étude et pour chaque bloc.

La figure 5 expose les résultats d'empreintes carbone par bloc pour le segment Orsay-Montpellier :

Empreinte carbone par bloc sur le segment Orsay-Montpellier

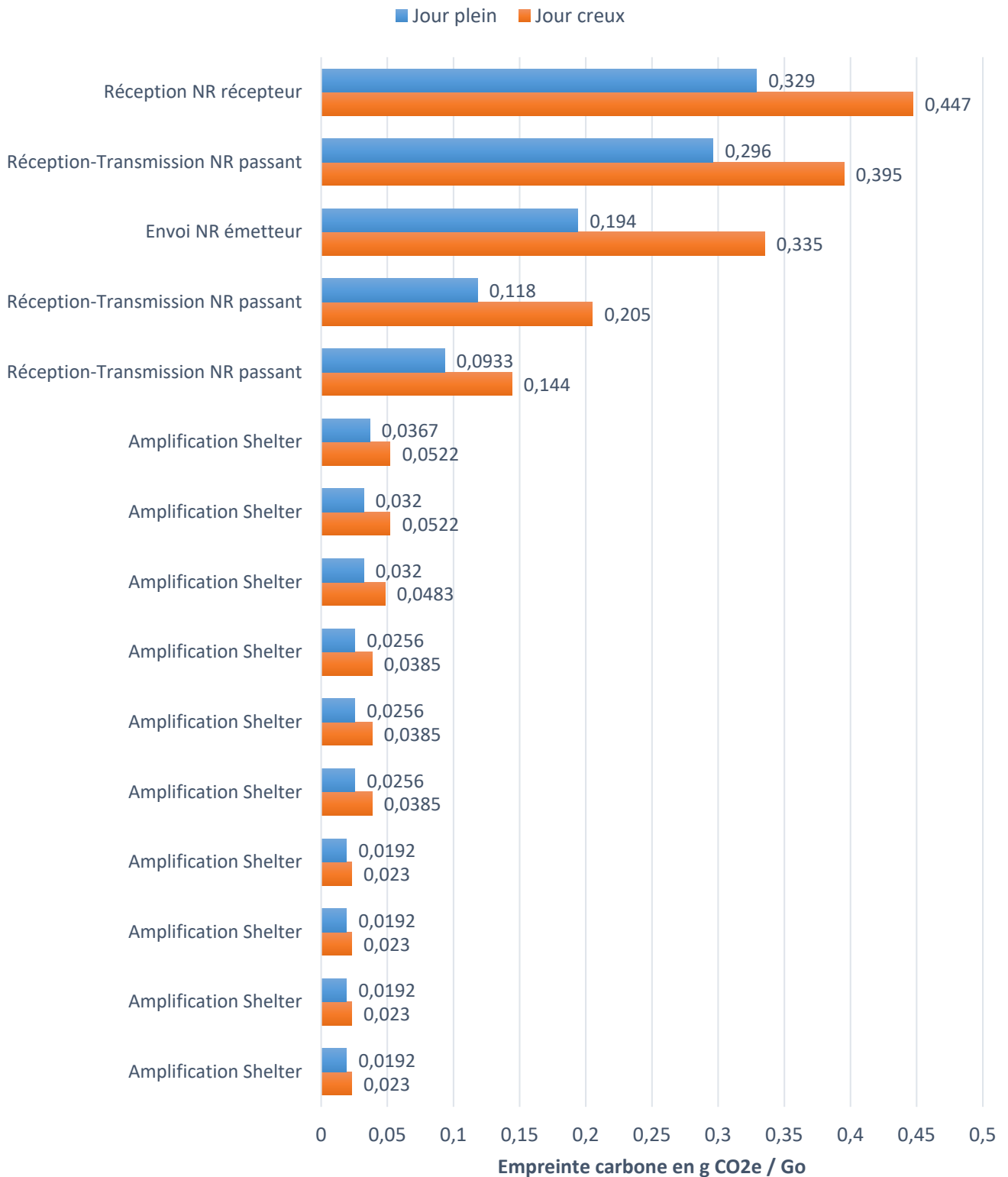


Figure 5 - empreinte carbone par bloc segment Orsay-Montpellier

III.2) Évaluation de l'empreinte carbone de la part du NOC

Les émissions CO₂e pour 1 Go du NOC sont identiques pour les deux segments. Cette part ne dépend pas des mesures directes de trafic mais des données plus générales sur le réseau RENATER. Pour calculer l'empreinte carbone de la part du NOC, nous utilisons des données de trafic sur une année.

Toutes les données utilisées du bloc supervision NOC sont décrites dans la partie II.9).

Dans un premier temps, on calcule la part liée à la consommation électrique des équipements de supervision du NOC sur un an.

Émissions CO₂e d'1 Go liées à l'utilisation des équipements du NOC

$$\begin{aligned} &= \frac{(\text{Consommation électrique des équipements du NOC sur le réseau en kWh} * PUE) * FE \text{ en kg CO}_2\text{e/kWh}}{\text{Trafic IP transitant sur le réseau renater durant 1 an en Go}} \\ &= (((66263) * 1,8) + 2998) * 0,108 / 490000000 \\ &= 2,69496E-05 \text{ kg CO}_2\text{e/Go} \end{aligned}$$

Puis, on calcule la part liée à la fabrication des équipements du NOC :

Pour le calcul, nous émettons l'hypothèse que le trafic n'évolue pas au cours des années sur le réseau RENATER.

Émissions CO₂e d'1 Go liées à la fabrication des équipements du NOC

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Impact fabrication équipements réseau kg CO}_2\text{e}}{\text{trafic IP sur RENATER sur 1 an en Go} \times \text{durée de vie en années}} \\ &\quad + \frac{\text{Impact fabrication équipements plateau en kg CO}_2\text{e/ an}}{\text{trafic IP sur le réseau RENATER sur 1 an en Go}} \\ &= (12992,5) / (490000000 * 10) + (3807 / 490000000) \\ &= 1,04209E-05 \text{ kg CO}_2\text{e/Go} \end{aligned}$$

Pour calculer la part du NOC de ce Go, on additionne les deux parts précédentes.

Émissions CO₂e d'1 Go pour la supervision du NOC

$$\begin{aligned} &= \text{Émissions CO}_2\text{e d'1 Go liées à l'utilisation en kg CO}_2\text{e} \\ &\quad + \text{émissions CO}_2\text{e d'1 Go liées à la fabrication en kg CO}_2\text{e} \\ &= 2,69496E-05 + 1,04209E-05 \\ &= 3,73706E-05 \text{ kg CO}_2\text{e/Go} \end{aligned}$$

Ainsi l'empreinte carbone de la supervision du NOC pour la transmission de 1 Go est de **3,73706E-05 kg CO₂e/Go** sur le réseau RENATER.

III.3) Évaluation de l'empreinte carbone de la part de la fibre optique

Pour calculer l'empreinte carbone de la part de la fibre optique, nous utilisons des données sur une année et nous émettons l'hypothèse que le trafic n'évolue pas au cours des années sur le réseau RENATER.

Émissions CO₂e d'1 Go pour la fibre optique

$$= \frac{\text{Nb de km de fibre optique sur le réseau} * \text{facteur émission fibre en kg CO}_2\text{e/km}}{\text{trafic IP sur RENATER sur 1 an en Go} * \text{durée de vie en années}} +$$
$$= (12000 * 26,45) / (490000000 * 25)$$
$$= 2,59184\text{E-}05 \text{ kg CO}_2\text{e/Go}$$

Ainsi l'empreinte carbone de la fibre optique pour la transmission de 1 Go est de **2,59184E-05 kg CO₂e/Go** sur le réseau RENATER

III.4) Évaluation de l'empreinte carbone de la transmission de 1 Go

Pour obtenir l'empreinte carbone d'un segment, il faut additionner l'empreinte carbone de chaque bloc plus celle du NOC et de la fibre optique pour 1 Go.

Émissions CO₂e pour la transmission d'1 Go pour un jour plein entre Orsay et Montpellier

$$= \text{Émissions CO}_2\text{e d'1 Go de chaque bloc} + \text{émissions CO}_2\text{e pour la supervision d'1 Go du NOC}$$
$$+ \text{émissions CO}_2\text{e d'1 Go de la fibre}$$
$$= 0,001286909 + 3,73706\text{E-}05 + 2,59184\text{E-}05$$
$$= 0,001350198 \text{ kg CO}_2\text{e/Go}$$

L'empreinte carbone de la transmission de 1 Go pour un jour plein est ainsi de **0,001350198 kg CO₂e/Go** sur le réseau RENATER.

On reproduit ce calcul pour les autres empreintes carbone. Puis, on exprime les résultats en g pour avoir des résultats plus lisibles en g CO₂e/Go.

Voici les résultats finaux pour l'empreinte carbone de la transmission de 1Go de données :

Type de journée	Empreinte carbone d'1Go en g CO ₂ e Jour plein	Empreinte carbone d'1Go en g CO ₂ e Jour creux
Orsay-Montpellier	1,4	2

Tableau 8 - empreinte carbone d'1Go par bloc

IV) Résultats

IV.1) Scénario de référence

Le scénario de référence est la transmission de 1 Go de données entre le site d'Orsay et le site de Montpellier.

Nous étudions deux journées types d'activité. Nous avons effectué des mesures directes le mardi 23 juin 2020, qui représente un jour plein d'activité, et le dimanche 28 juin 2020, qui représente un jour creux d'activité.

Le jour moyenné a été calculé à partir du trafic IP transitant sur une année et la consommation électrique stable par équipement (en comptant 104 jours creux et 261 jours pleins). Les résultats correspondants au jour moyenné ne sont donc pas une moyenne des résultats des jours creux et pleins, d'autant plus que les années de référence sont différentes ET que la période de mesure pour les jours pleins et creux était une période de forte activité en télétravail (période COVID) alors que l'année 2019 a été une année pleine d'activité.

La figure 6 montre les résultats de la modélisation de l'empreinte carbone par bloc du jour moyenné sur le segment Orsay-Montpellier :

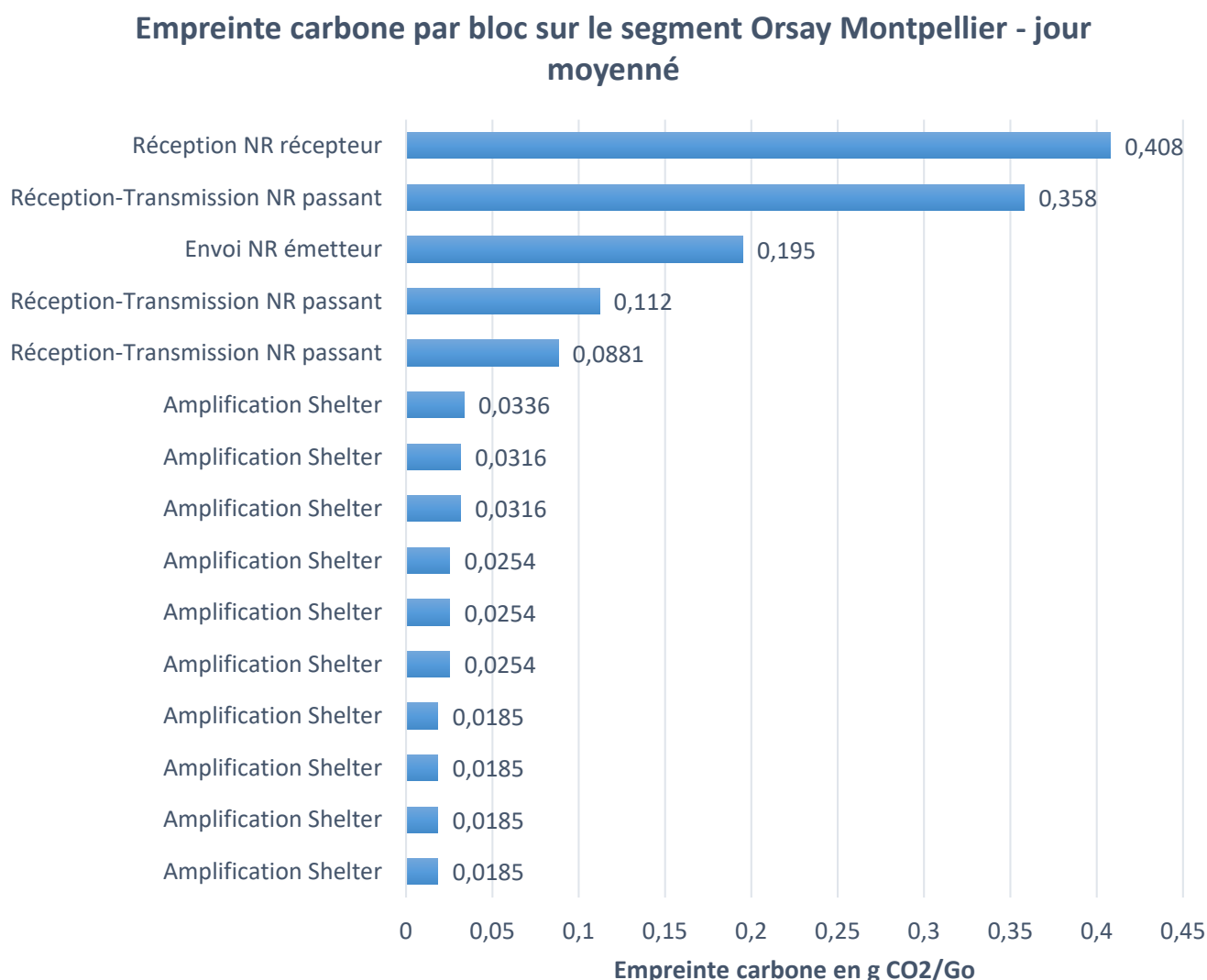


Figure 6 - empreinte carbone par bloc segment Orsay-Montpellier du jour moyenné

Le tableau 9 ci-dessous présente un résumé des résultats de l’empreinte carbone d’un Go en fonction du type de journée.

Empreinte carbone d'1 Go en g CO ₂ e/Go en fonction du type de journée			
Type de journée	Jour plein (23/06/20)	Jour creux (28/06/20)	Jour moyenné (calculé)
Orsay-Montpellier	1,4	2	1,5

Tableau 9 - empreinte carbone en fonction du type de journée en g CO₂e/Go

Voici la répartition de la transmission de données sur le segment Orsay – Montpellier :

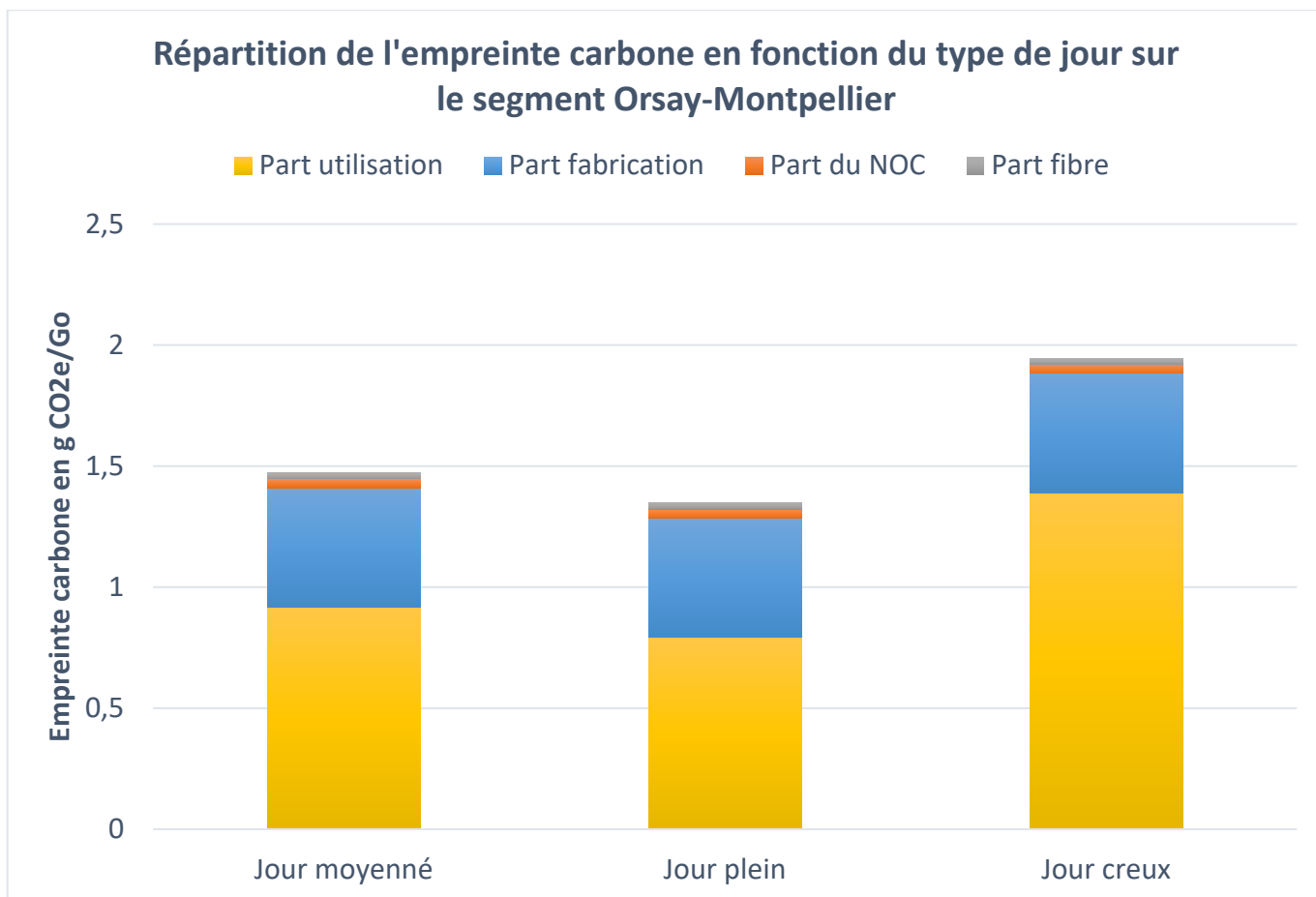


Figure 7 - répartition de l'empreinte carbone en fonction du type de journée sur le Orsay-Montpellier

La répartition des émissions CO₂e générées lors de la transmission d’un gigaoctet, visible sur la figure 7, montre que l’ordre d’impact reste le même en fonction du type de journée. La part d’émissions la plus importante est la part liée à l’utilisation (plus de 59% sur le segment Orsay-Montpellier), puis la part liée à la fabrication, ensuite la part de la supervision du NOC puis la part de la fibre optique.

Nous remarquons également que :

- Plus le trafic IP est important, plus l’impact CO₂e du Go diminue. Ceci s’explique par le fait que la consommation électrique des équipements réseau est quasi indépendante du trafic.
- Qu’importe le nombre d’équipements et le type de journée, la part d’utilisation reste la part la plus dominante de l’empreinte carbone d’un Go.

IV.2) Analyses de sensibilité

Pour les analyses de sensibilité, nous nous basons uniquement sur le jour moyenné.

IV.2.1) EN FONCTION DE LA DENSITÉ DE L'INFRASTRUCTURE RÉSEAU

Nous avons refait l'ensemble des mesures et calculs sur un segment différent du réseau RENATER. Le segment Orsay – Jussieu a la particularité d'être plus court en distance mais plus dense en nombre d'équipements par km.

La figure 8 ci-dessous compare les résultats obtenus sur les deux scénarios.

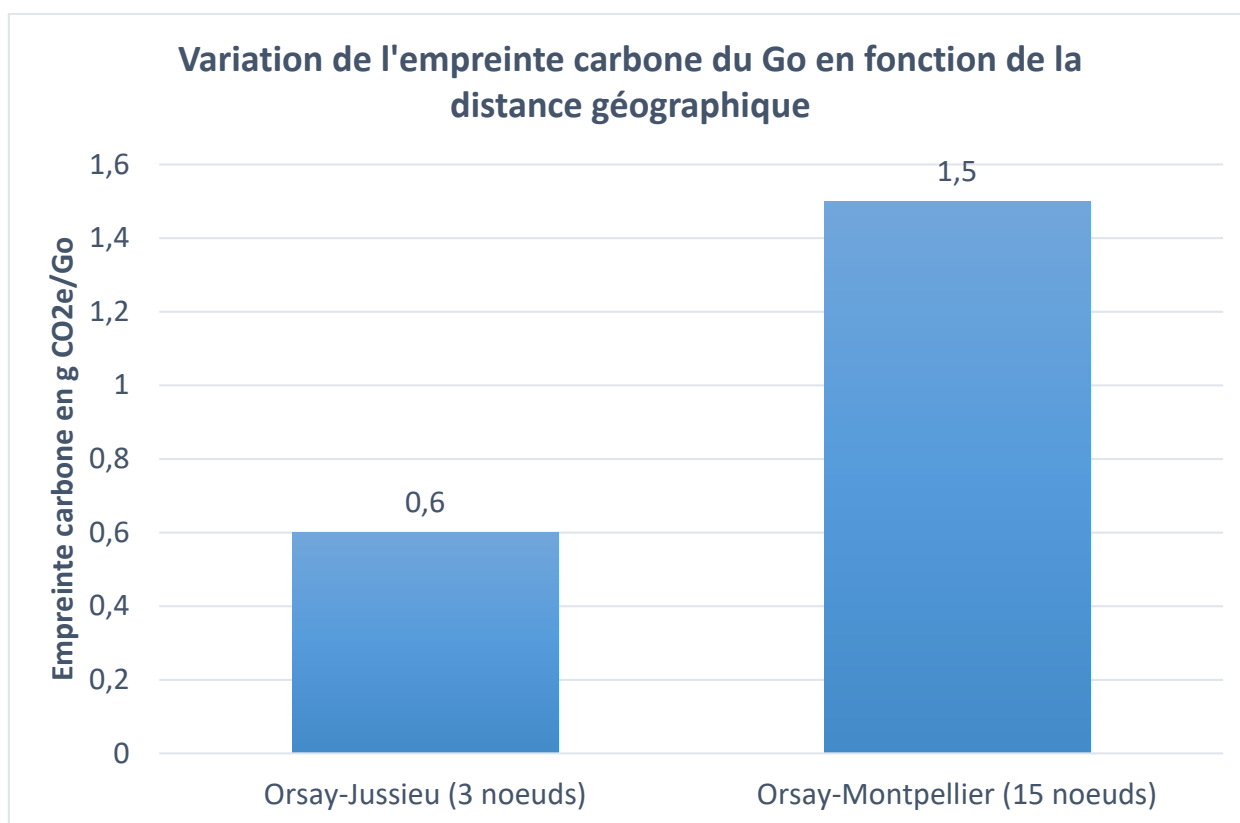


Figure 8 - variation de l'empreinte carbone du Go en fonction de la distance géographique

Sur le segment Orsay-Jussieu de la figure 8, où la densité des nœuds de réseau est forte et le nombre de nœuds entre le site émetteur et le site récepteur faible, l'empreinte carbone est largement inférieure au segment Orsay-Montpellier.

Entre les segments, il y a un facteur de quasiment 3 pour l'empreinte carbone et de 5 pour le nombre de nœuds. La densité de l'infrastructure entre le site émetteur et le site récepteur et donc la distance géographique a une influence sur l'impact carbone de la transmission. Plus la densité de l'infrastructure est faible et la distance géographique élevée, plus il y a d'équipements impliqués dans la transmission et donc plus l'empreinte carbone de la transmission est élevée.

IV.2.2) EN FONCTION DU PUE

PUE de référence : 1,8

Le PUE influence directement les émissions de GES dues au fonctionnement des équipements de réseau actifs qui se trouvent dans des datacentres. Nous avons fait varier le PUE de 1 à 2. La figure 9 illustre les résultats. A chaque palier, lorsque nous augmentons le PUE de 0,1, l'empreinte carbone augmente de 3,56%. Cette influence nécessite tout de même de se concentrer vers une efficacité énergétique des datacentres.

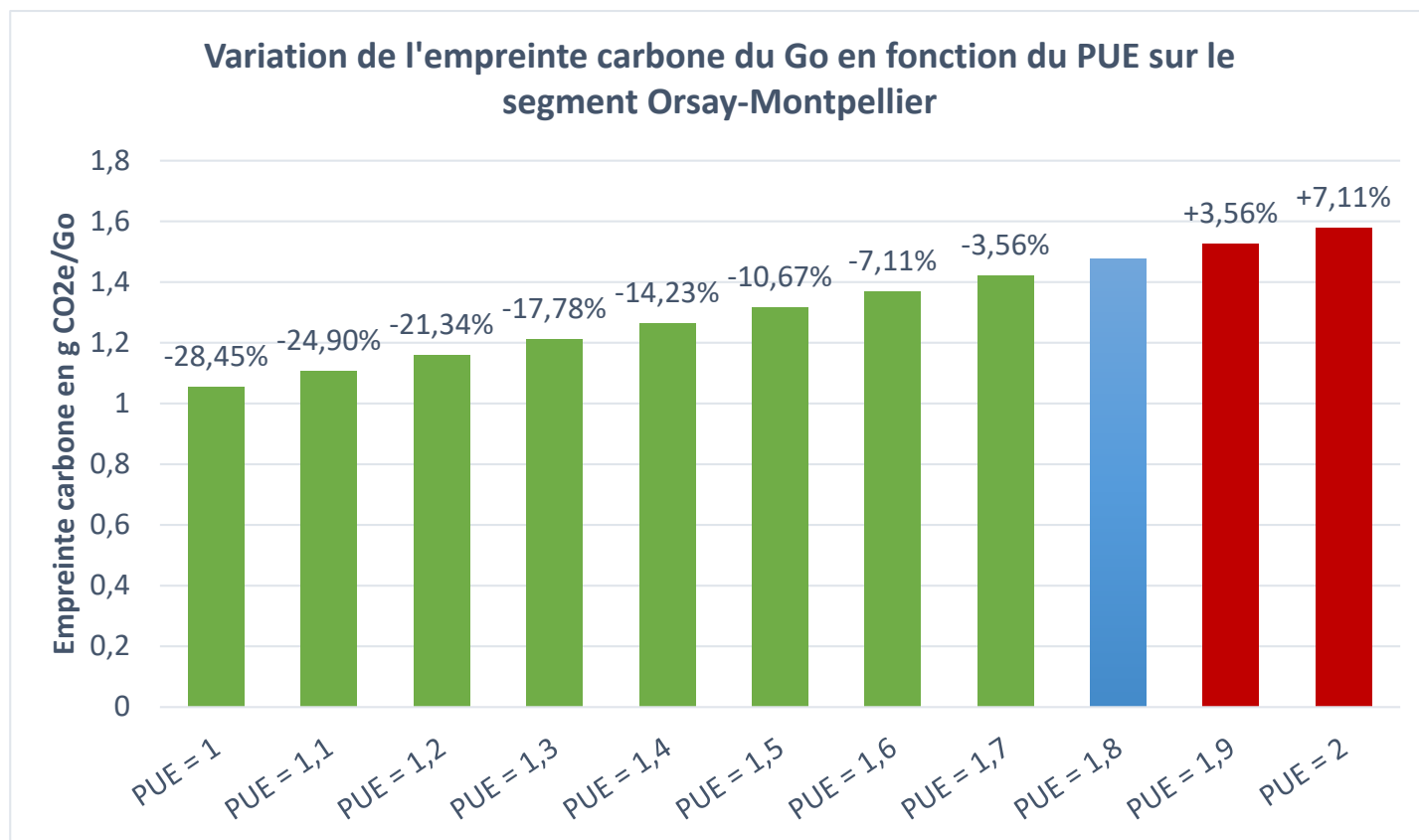


Figure 9 - variation de l'empreinte carbone en fonction du PUE - segment Orsay-Montpellier

IV.2.3) EN FONCTION DE LA DURÉE DE VIE DES ÉQUIPEMENTS

Durées de vie de référence :

- 10 ans pour les routeurs
- 12 ans pour les équipements optiques

Nous avons fait varier la durée de vie des équipements de 5 à 20 ans. La figure 10 illustre les résultats. Nous constatons que la durée de vie des équipements sur le réseau a une influence sur l'empreinte carbone de la transmission de données. En doublant la durée de vie des équipements, l'empreinte carbone par Go baisserait de plus de 13%. Plus l'équipement sera utilisé longtemps sur le réseau, moins l'impact carbone sera fort.

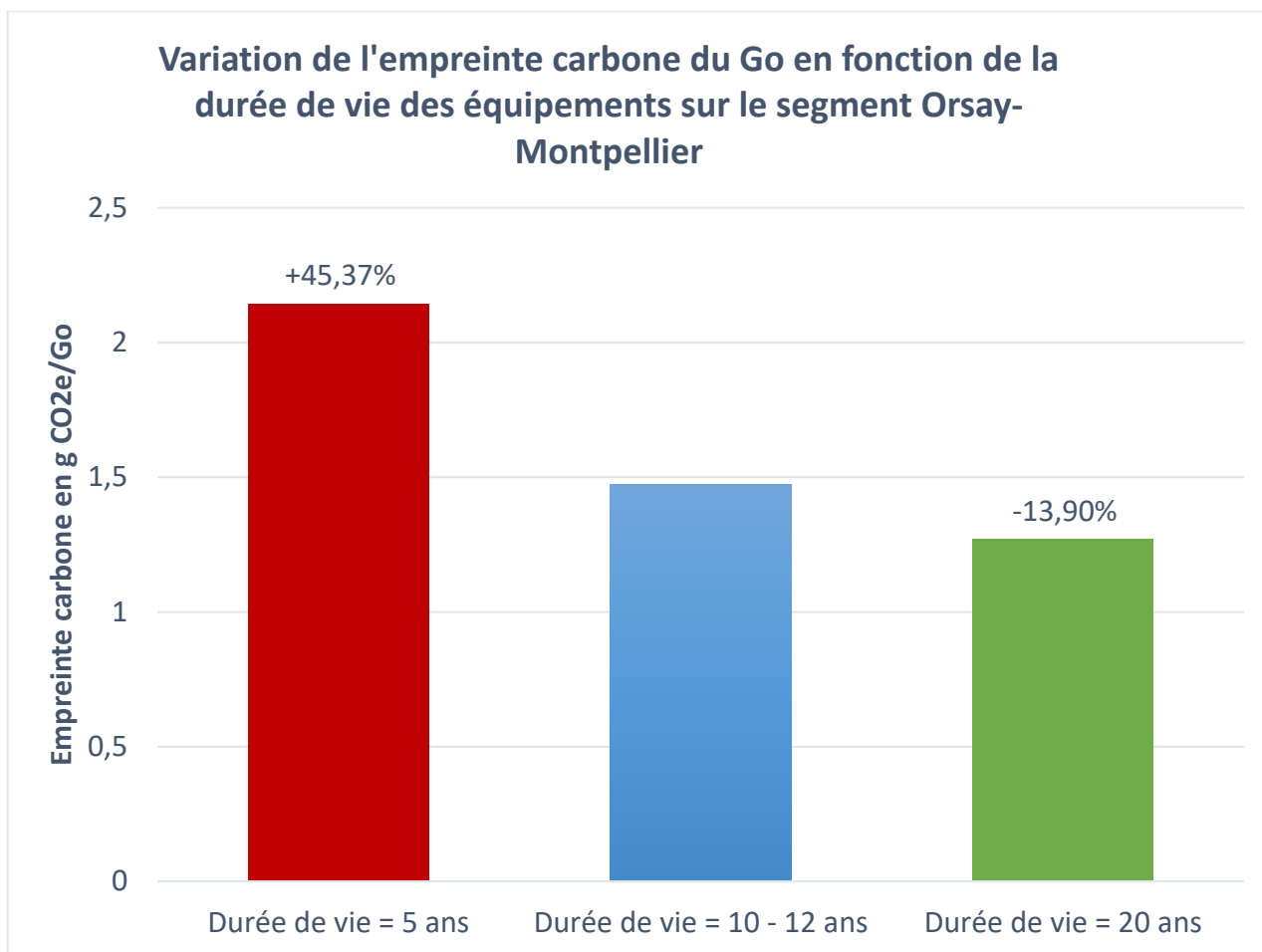


Figure 10 - variation de l'empreinte carbone en fonction de la durée de vie des équipements – segment Orsay-Montpellier

IV.2.4) EN FONCTION DU FACTEUR D'ÉMISSION ÉLECTRIQUE

Facteur d'émission de référence : 0,108 kg CO₂e/kWh de la source ELDC

Nous avons fait varier le facteur d'émission électrique de référence d'une des valeurs les plus basses proposées par l'ADEME (0,0456 kg CO₂e/kWh) au facteur d'émission électrique mondial moyen utilisé par l'entreprise Cisco (0,4853 kg CO₂e/kWh). Les résultats sont visibles sur le figure 11.

Nous pouvons remarquer que la source du facteur d'émission fait extrêmement varier le résultat de l'empreinte carbone. La France est l'un des pays qui a une électricité la moins carbonée due à une part majoritaire de la production d'électricité à base d'uranium pour l'énergie nucléaire. En utilisant le facteur d'émission électrique français fourni par l'ADEME, notre résultat final baisserait de 37%. Or, nous avons choisi le facteur d'émission électrique français fourni par la base ELDC, spécialisée pour les ACV. Ce choix a un direct impact sur le résultat final.

Si cette étude avait été faite dans une région du globe où l'électricité est plus carbonée (charbon, pétrole, gaz naturel, etc.), l'impact CO₂e serait significativement supérieur (+223% en utilisant le facteur d'émission électrique mondial utilisé par Cisco).

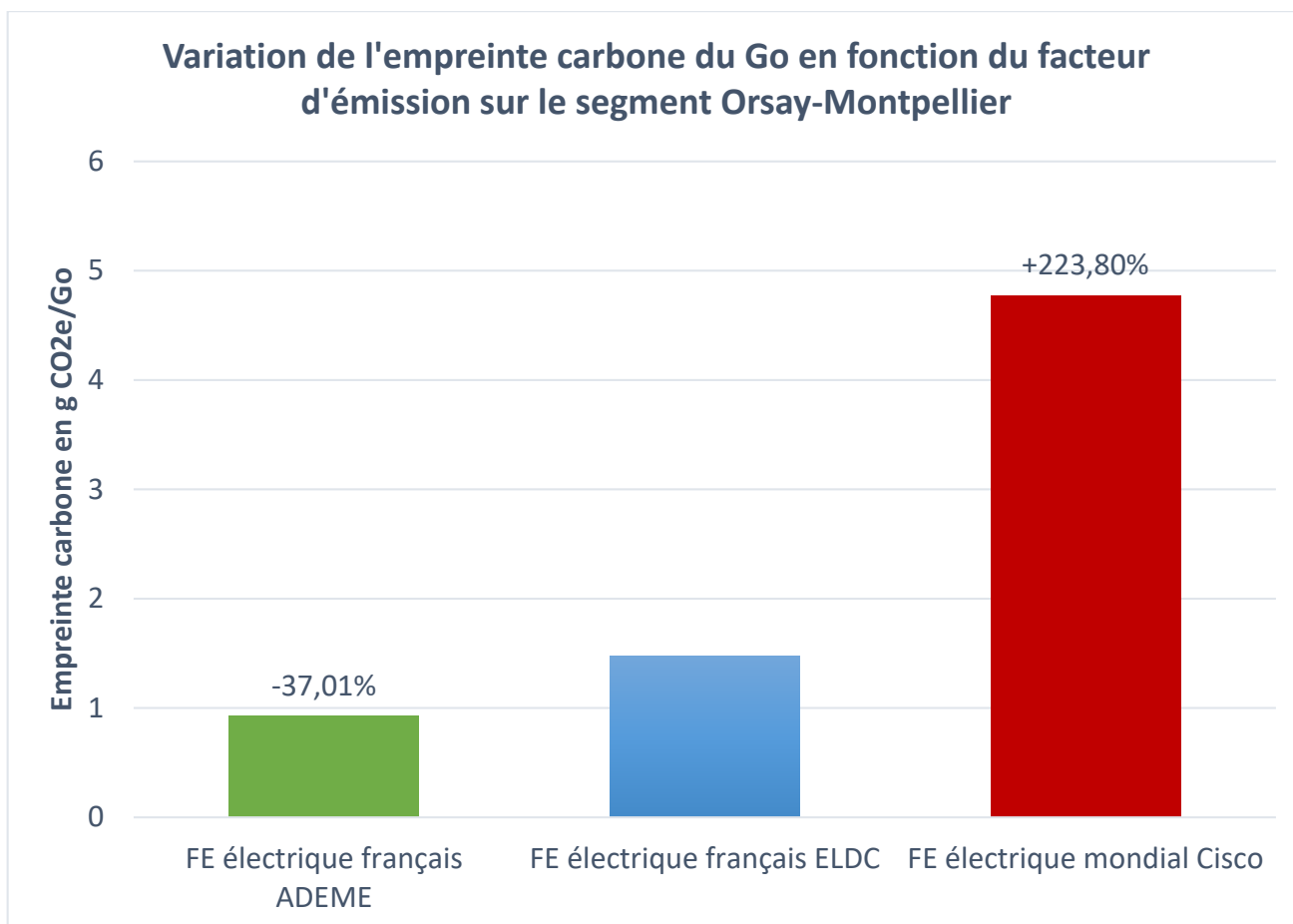


Figure 11 - variation de l'empreinte carbone en fonction du facteur d'émission électrique segment Orsay-Montpellier

IV.2.5) EN FONCTION DU TRAFIC IP SUR LES ÉQUIPEMENTS

% trafic de référence : 1

Nous avons fait varier la quantité de données (trafic) transitant sur les équipements, d'un facteur 1 à 50, sur les segments de notre étude.

La valeur 1 correspond aux mesures directes de l'étude. En faisant varier cet indicateur nous simulons un réseau qui aurait un trafic bien supérieur (tout en restant dans les limites possibles). Cela signifie qu'en ayant une valeur à 10, les trafics sont multipliés par 10, puis 20 etc. pour le calcul de l'empreinte carbone. Avec la capacité des cartes actuellement installées sur les équipements, le trafic transitant sur les équipements peut théoriquement être multiplié par 50.

Plusieurs raisons expliquent le surdimensionnement des réseaux :

- La tendance générale du trafic est en augmentation constante (sauf exception : la période du confinement par exemple). Il est ainsi nécessaire pour les architectes réseaux de prévoir cette augmentation en installant les équipements.
- Il y a des pics de fréquentations sur les liaisons et le but est d'éviter les encombrements des liaisons pour garder une fluidité de trafic.
- La résilience est un enjeu majeur du réseau. Chez RENATER, les équipements ont généralement des cartes d'interface, de routage et autres en double pour cet enjeu. Or, cela signifie que ces cartes ont été fabriquées et sont alimentées en permanence alors qu'elles ne sont pas utilisées.

La multiplication du trafic par 10 sur les équipements amène une baisse d'impact CO₂e significative de plus de 86% et de plus de 93% CO₂e si les équipements étaient utilisés au maximum de leur capacité.

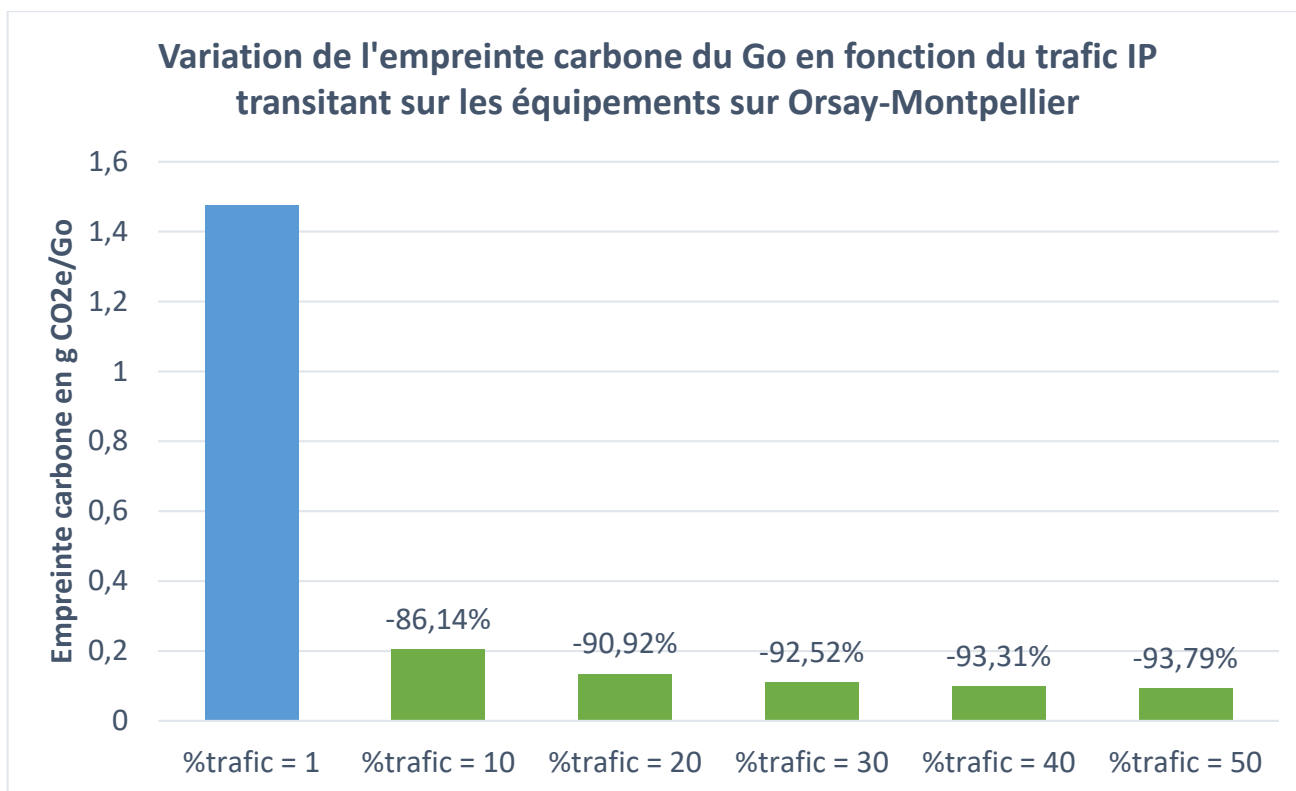


Figure 12 - variation de l'empreinte carbone en fonction de la capacité trafic des équipements segment Orsay-Montpellier

Conclusion

D'après cette étude, **transmettre 1 Go de données sur le réseau de fibre optique RENATER entre Orsay et Montpellier a une empreinte carbone moyenne de 1,5 g équivalent CO₂**. Les impacts CO₂e de la transmission proviennent dans l'ordre d'influence : 1. de la phase d'utilisation des équipements, 2. de la phase de fabrication des équipements, 3. de la supervision du NOC, 4. de la fibre optique.

La phase d'utilisation des équipements crée la majorité des impacts CO₂e. Les équipements réseaux et de transports optiques sont alimentés en permanence¹⁴ et ont une consommation quasi indépendante du trafic dans notre cas d'étude. **Pour limiter l'empreinte carbone d'un Go sur le réseau internet, il est primordial de penser l'architecture du réseau pour limiter le nombre d'équipements actifs.** Lors du renouvellement du parc, une piste serait d'intégrer des équipements dont la consommation électrique est proportionnelle au trafic IP.

La phase de fabrication des équipements est la seconde contributrice au réchauffement climatique. Même si l'impact carbone de la fabrication des équipements du réseau est excessivement élevé, il faut noter que la durée de vie des ceux-là est supérieure à 10 ans sur le réseau RENATER ce qui réduit la facture carbone. Un des enjeux des équipements informatiques est d'avoir la plus longue durée de vie et de favoriser le réemploi.

La supervision du réseau (NOC) est le troisième impact carbone non négligeable de notre modélisation. À noter que sont pris en compte ici uniquement les équipements informatiques mobilisés dans le cadre de la supervision. Il serait intéressant de réaliser un bilan carbone complet du NOC afin d'intégrer les autres impacts comme les GES émis par les déplacements domicile-travail, par le chauffage dans le bâtiment, etc.

La fibre optique est le dernier vecteur d'impact CO₂e de notre modélisation. Le facteur d'émission de la fibre utilisé ne comprend pas l'installation et les moyens mis en œuvre pour permettre l'infrastructure du réseau. Ceci a probablement un fort impact carbone. Il serait intéressant d'obtenir un facteur d'émission de la fibre optique plus complet qui mesurerait l'impact de l'installation de celle-ci sur le territoire pour un meilleur résultat.

En étudiant l'empreinte carbone d'un Go sur les journées creuses et sur les journées pleines d'activité (voir les résultats sur le tableau 8 du chapitre III.4), **nous révélons que l'empreinte carbone est plus élevée lors de journées creuses**, où le trafic est faible. Cela exprime l'importance d'exploiter au maximum la capacité de trafic des équipements réseaux dont l'analyse de sensibilité en partie IV.2.5. est le sujet. Afin de répartir l'impact carbone de la transmission de données, une piste serait de proposer systématiquement des services d'envoi de données différés afin d'activer ces envois la nuit ou le week-end.

Il existe un autre vecteur d'impact carbone important pour la transmission de données : la distance « géographique » entre deux points. Il est difficile de réduire la distance entre deux sites à la seule distance géographique parce que la densité des équipements dépend aussi de la densité des utilisateurs. Cependant, il arrive régulièrement que les envois se fassent vers des sites extérieurs au réseau RENATER, il faut donc passer par des points de peering¹⁵ vers d'autres opérateurs internet. Ces points de peering sont limités sur le réseau. Cependant, un des axes pour réduire l'impact environnemental pourrait être d'augmenter ces points de peering vers les autres opérateurs internet. Ceci éviterait des chemins de routage tortueux et qui n'ont parfois aucun sens en terme de distance géographique. Par ailleurs, la décentralisation

¹⁴ 24h/24 7jours/7

¹⁵ Les points de peering sont des points d'échange de trafic internet avec d'autres pairs c'est-à-dire avec d'autres FAI ou fournisseurs de contenus.

des services internet pourrait réduire les distances dans la transmission de données tout comme des algorithmes de routage pensés en fonction des distances géographiques.

Pour résumer :

Comment réduire l'empreinte carbone de la transmission de données ?

Les leviers de réduction de l'empreinte carbone de la transmission de 1 Go sur le réseau sont :

- La réduction de l'impact des datacentres et sites qui hébergent les équipements des NR notamment une réduction du PUE des sites.
- L'augmentation de la durée de vie des équipements.
- L'optimisation de l'utilisation des équipements, c'est-à-dire maximiser les liaisons et utiliser au plus les cartes installées sur les équipements.
- L'optimisation des chemins de routage en diminuant le nombre de nœuds au maximum, en privilégiant les courtes distances, en augmentant les points de peering vers les autres opérateurs pour éviter les longs trajets de données.
- L'optimisation des envois des volumes importants de données en privilégiant les périodes creuses d'activité sur le réseau afin de mieux répartir les flux de données si cela est possible.
- La réduction de la consommation énergétique des équipements en évitant la redondance des alimentations, des équipements et des cartes. Penser éventuellement à un système de monitoring des alimentations pour veiller au bon fonctionnement.
- La demande systématique des impacts de fabrication et de transports des équipements lors des appels d'offres.
- La sensibilisation des utilisateurs, des pouvoirs publics et des décideurs sur l'impact des données envoyées : utiliser le réseau internet a un coût environnemental.
- La lutte contre l'obsolescence programmée des équipements en faisant perdurer le plus possible les équipements et opter pour la réutilisation.

Limites de l'étude

Le nombre important de données recueillies en mesures directes satisfait notre désir initial de faire une étude ACV simplifiée par une approche ascendante. Bien que fournie sur le plan quantitatif, cette étude comporte cependant des limites. Les voici :

- La phase de fin de vie des équipements n'est pas prise en compte dans l'étude car nous ne disposons pas de données sur la fin de vie des équipements.
- Pas d'autres indicateurs d'impacts environnementaux que les GES.
- Pas de mesures directes pour les plateformes de transport optique WDM présents dans les shelters.
- Pas de calculs d'incertitudes.

Dans notre étude, nous avons plusieurs niveaux d'incertitudes, les voici :

- L'extrapolation des données sur l'impact de fabrication des équipements Infinera.
- Les données fournies par l'équipementier Cisco sur l'impact de fabrication de leurs équipements ont été calculées avec une méthode de reverse engineering.
- Pas de transparence sur les méthodes de calculs employées par l'équipementier Juniper concernant l'impact de fabrication de leurs composants.
- Pas d'information sur la durée de vie des équipements du NOC.
- Liste d'équipements non exhaustive du NOC.
- Pas de mesures directes sur la consommation électrique des plateformes de transport optiques WDM présents dans les shelters.

- Le trafic IP total ayant transité sur le backbone de RENATER est de 2018 et non 2019.
- L'utilisation du facteur émission électrique fournie par ELDC. L'utilisation d'un facteur d'émission électrique produit à lui seul des incertitudes.

À ce stade, il nous paraît intéressant pour continuer ces évaluations d'empreinte carbone de :

- Faire une étude sur la transmission de bout en bout en incluant les terminaux utilisateurs et au moins les équipements des réseaux en bout de chaîne.
- Faire des études similaires sur d'autres segments pour avoir plus de mesures et donc plus de résultats.
- Utiliser cette méthodologie pour créer un système de métrologie carbone du réseau internet.
- Intégrer les incertitudes.
- Faire une analyse plus poussée de l'empreinte carbone en incluant l'empreinte carbone des personnes participant à la conception, à la maintenance et à l'installation des équipements réseaux ainsi que l'empreinte des bâtiments.
- Intégrer d'autres indicateurs d'impacts environnementaux.

En conclusion, cette étude apporte des premiers éléments de réponses sur l'empreinte carbone de la transmission de données sur le réseau RENATER, en France métropolitaine. En axant notre étude seulement sur le potentiel de réchauffement climatique, il peut sembler que l'impact carbone par Go trouvé est faible (1,5 g CO₂e/Go sur le segment Orsay-Montpellier). Or, il est rare qu'un seul Go soit acheminé sur le réseau RENATER. Chaque jour, ce sont des millions de Go qui y transitent avec une nette progression au fur et à mesure des années, ce qui génère un impact élevé pour la transmission de données sur internet. **Envoyer 1 To de données entre Orsay et Montpellier, correspondant à 5,95 jours de visionnage Netflix en ultra HD¹⁶, revient à parcourir 7,77 km¹⁷ en voiture.** Envoyer 50 To de données entre Orsay et Montpellier, correspondant au trafic sortant du NR Montpellier sur une journée, revient à parcourir environ 388 km en voiture soit un trajet aller Paris -Nantes. Le clic sur internet a encore un coût invisible pour la majorité des utilisateurs qu'il convient de mettre en lumière à travers des campagnes de sensibilisation. Dès lors que des indicateurs fiables apparaîtront sur les autres catégories d'impacts environnementaux, nous pourrions compléter ces études d'ACV simplifiées.

Contacts :

Marion Ficher : marion.ficher@cri-paris.org

Françoise Berthoud : Francoise.Berthoud@grenoble.cnrs.fr

Anne-Laure Ligozat : anne-laure.ligozat@limsi.fr

¹⁶ Calculé avec l'indicateur fourni par Netflix pour la qualité de visionnage vidéo en ultra HD qui est de 7 Go/h.

¹⁷ Calculé avec l'indicateur Voiture motorisation moyenne de la Base carbone[®] de l'ADEME en 2018 qui est de 0,193 kg CO₂e/km.

Annexes

Références

Articles scientifiques

- J. Aslan, K. Mayers, J. G. Koomey and C. France, « Electricity Intensity of Internet Data Transmission - Untangling the Estimates », *Journal of Industrial Ecology*, Volume 22 numéro 4, 2018, DOI : 10.1111/jiec.12630
- Vlad C. Coroama, Lorenz M. Hilty « Assessing Internet Energy intensity: a review of methods and results », *Environmental Impact Assessment Review* 45, 2014, p. 63-68
- Vlad C. Coroama, Lorenz M. Hilty, Ernst Heiri, and Frank M. Horn, « The Direct Energy Demand of Internet », *Journal of Industrial Ecology*, Volume 17 numéro 5, 2013, DOI : 10.1111/jiec.12048
- L. Krug, M. Shackelton, F. Saffre, « Understanding the Environmental costs of fixed line networking », *e-Energy*'14 June 11, 2014, <http://dx.doi.org/10.1145/2602044.2602057>
- D. Schien, C. Preist, «A Review of Top-Down Models of Internet Network Energy Intensity », University of Bristol, ICT4S 2014

Livre

- « Impacts écologiques des Technologies de l'Information et de la Communication », Groupe EcoInfo, EPD Science, 2012

Rapports

ADEME

- La face cachée du numérique (2019) : <https://www.ademe.fr/face-cachee-numerique>

ADVA

- Rapport de développement durable ADVA : <https://www.adva.com/en/about-us/sustainability/reports-and-policies/sustainability-reports>

CISCO

- Cisco Annual Internet Report (2018 – 2023) : <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/executive-perspectives/annual-internet-report/index.html#~insights>
- Cisco Corporate Social Responsibility Report (2019) : <https://www.cisco.com/c/en/us/about/csr/csr-report.html>

DELL

- Résultat d'ACV du serveur Dell power edge R630 : https://i.dell.com/sites/csdocuments/CorpComm_Docs/en/carbon-footprint-poweredge-r630.pdf
- Résultat d'ACV du serveur Dell power edge R640 : https://i.dell.com/sites/csdocuments/CorpComm_Docs/en/carbon-footprint-poweredge-r640.pdf

The Shift Project

- Lean ICT : towards digital sobriety : https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/03/Lean-ICT-Report_The-Shift-Project_2019.pdf

Sites internet

- Site officiel d'EcoInfo : <https://ecoinfo.cnrs.fr/>
- Site officiel de ELDC : <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/>
- Base de données publique de la Base Carbone® de l'ADEME : [https://data.ademe.fr/datasets/base-carbone\(r\)](https://data.ademe.fr/datasets/base-carbone(r))

Sigles

ACV	Analyse de Cycle de Vie
CO ₂	Dioxyde de carbone
ESR	Enseignement Supérieur et Recherche
FAI	Fournisseur d'Accès à Internet
GES	Gaz à Effet de Serre
GIP	Groupe d'Intérêt Public
Go	Gigaotctet
IP	Internet Protocol
ISO	International Organisation for Standardisation
OSI	Open Systems Interconnexion
OTN	Optical Transport Network
NOC	Network Operations Center
NR	Nœud RENATER
RENATER	Réseau national de télécommunications pour la technologie, l'enseignement et la recherche
SNMP	Simple Network Management Protocol
TIC	Technologies de l'Information et de la Communication
UF	Unité Fonctionnelle
VM	Virtual Machine
WDM	Wavelength-division Multiplexing

Glossaire

B

Backbone ou épine dorsale : artère principale d'un réseau de télécommunications.

Bit ou élément binaire : est l'unité la plus simple dans un système de numération, ne pouvant prendre que deux valeurs, désignées le plus souvent par les chiffres 0 et 1. Les systèmes numériques traitent exclusivement des informations réduites en bits, en général associés dans des groupes de taille fixe appelés bytes.

C

Commutateur ou switch : est un équipement qui relie plusieurs segments (câbles ou fibres) dans un réseau informatique et de télécommunication et qui permet de créer des circuits virtuels. La commutation est un des deux modes de transport de trame au sein des réseaux informatiques et de communication, l'autre étant le routage.

Commutateur OTN : équipement optique, fonction définie dans la partie II.3.2).

G

GES (Gaz à Effet de Serre) : gaz présents dans l'atmosphère qui retiennent une partie de l'énergie réémise par la Terre.

M

Métrologie : science de la mesure.

Modem (modulateur - démodulateur) : équipement de transmission qui fabrique, avec les données binaires à transmettre, un signal dont les caractéristiques sont adaptées au support de transmission. Inversement, en réception, il extrait la suite de données binaires du signal reçu.

O

Octet : est un multiplet de 8 bits codant une information (1 octet = 8 bits). Dans ce système de codage, s'appuyant sur le système binaire, un octet permet de représenter 2^8 nombres, soit 256 valeurs différentes. Un octet permet de coder des valeurs numériques ou jusqu'à 256 caractères différents.

P

Paquet : entité de transmission de la couche réseau.

PUE (Power Usage Effectiveness) : ratio entre la quantité d'électricité nécessaire pour alimenter le site d'accueil de l'équipement (refroidissement, salle, alimentation, etc) et la quantité d'électricité nécessaire pour alimenter l'équipement étudié.

$$PUE = \frac{\text{Quantité d'énergie nécessaire au site d'accueil de l'équipement}}{\text{Quantité d'énergie délivrée pour alimenter l'équipement}}$$

Où : $1 < PUE < \infty$

R

Routeur : système assurant l'acheminement des informations d'une source vers un ou plusieurs destinataires. Sa fonction est définie dans la partie II.3.1) du rapport.

S

Shelter : point de régénération des signaux optiques sur le réseau.

SNMP : protocole de communication qui permet aux administrateurs réseau de gérer les équipements du réseau, de superviser et de diagnostiquer des problèmes réseaux et matériels à distance.

T

TCP/IP : est l'ensemble des protocoles assurant le transport d'information dans l'internet, aussi appelée DoD Standard ou bien DoD Model ou encore DoD TCP/IP ou US DoD Model.