CONVENTION IESF SUR LES CONNAISSANCES

Évaluation environnementale

Analyse du cycle de vie (ACV)

Paul Robineau, Silvio Clément, Callista Spiteri, Lou Grimal

2025 – 2026

Nous remercions le comité de pilotage de la Convention IESF sur les Connaissances pour sa relecture du rapport.

Ce rapport présente l'évaluation environnementale de la Convention IESF sur les Connaissances, conduite selon les principes des normes ISO 14040 et ISO 14044 avec la méthode d'impact `Environmental Footprint 3.1` – abrégée `EF 3.1` – ainsi que les bases de données `ecoinvent 3.11` et `Agribalyse 3.2`. L'évaluation emploie l'approche de l'analyse du cycle de vie (ACV) et a été réalisée *via* `brightway 2.5` et son interface graphique `activity browser`.

Note sur l'utilisation d'IA générative : différents modèles de l'outil `claude code` ont été employés à diverses étapes, notamment pour la génération de code `python` permettant de traiter les données – notamment la création des outils `RailTrace` et `AgribalyseAutoderive` – et pour la mise en forme du présent document *via* `typst`. L'analyse et l'interprétation des résultats sont un travail humain des auteurices de ce rapport, qui en assument l'entière responsabilité.

Sommaire

1 Résumé **3**
2 Objectifs et champ de l'étude **4**
2.1 Objectifs et destinataires 4
2.2 Unité fonctionnelle et flux de référence 4
2.3 Frontières du système 5
2.4 Règle de coupure, exclusions et hypothèses 5
3 Inventaire du cycle de vie **6**
3.1 Bases de données et cohérence des sources 6
3.2 Transports 6
3.3 Hébergement 9
3.4 Usages numériques 10
3.5 Alimentation 10
3.6 Traitement de l'incertitude 11
4 Méthode d'évaluation des impacts **12**
4.1 Catégories d'impact et classes de robustesse 12
4.2 Simulation Monte-Carlo 12
4.3 Test de distinguabilité 12
5 Résultats **13**
5.1 Totaux par catégorie d'impact 13
5.2 Contribution par composante 13
5.3 Contribution par étape du cycle 15
5.4 Détail modal du transport 15
5.5 Comparaison entre weekends 18
6 Incertitude, cohérence et sensibilité **18**
6.1 Convergence de la simulation 18
6.2 Contrôle de cohérence déterministe / Monte-Carlo 20
6.3 Catégories non exploitables 21
6.4 Distinguabilité des composantes 22
6.5 Sensibilité au choix de scénario pour l'alimentation 22
6.6 Scénarios de transport 23
7 Interprétation **25**
7.1 Points chauds 25
7.2 Contrôles de complétude, de cohérence et de sensibilité 25
7.3 Limites 25
8 Recommandations **26**
9 Conclusion **26**
10 Annexe : résultats complets **28**
11 Annexe : reproductibilité **30**
12 Références **31**

1 Résumé

La Convention IESF sur les Connaissances a été un processus délibératif de quatre weekends de travail en présentiel réunissant une cinquantaine de docteur·es et doctorant·es, complétés par un travail en ligne entre les weekends et par le fonctionnement d'un comité de pilotage. Le comité de pilotage a commencé à travailler sur l'organisation de l'évènement un an avant l'ensemble des weekends, qui se sont étalés entre septembre 2025 et janvier 2026. Cette étude quantifie l'empreinte environnementale de la convention, depuis le début des travaux du comité de pilotage, formation des personnes facilitatrices incluse, jusqu'au dernier weekend ayant donné naissance au Rapport de la convention. La phase de restitution, postérieure au dernier weekend, est exclue du périmètre. Elle utilise une approche d'analyse du cycle de vie (ACV) attributionnelle, prenant en compte les flux de matière et d'énergie depuis l'extraction jusqu'à la production de déchets ou recyclage, et une analyse sur différentes catégories d'impacts.

En approche déterministe, sans prise en compte des incertitudes, l'empreinte carbone de la convention s'établit à 11 237 kg CO_2 eq, soit environ 225 kg CO_2 eq par participant·e. Lorsque les incertitudes sont prises en compte, la simulation Monte-Carlo situe la médiane à 10 800 kg CO_2 eq, dans un intervalle de confiance à 90 % allant de 9 532 à 12 386. La consommation d'eau s'établit de son côté à 7 688 m^3 équivalents mondiaux privés, soit 154 m^3 par participant·e. Avec incertitudes prises en compte, la simulation Monte-Carlo situe la médiane à 8 238 m^3, dans un intervalle de confiance à 90 % allant de 6 588 à 10 941.

Les 225 kg CO_2 eq par personne équivalent – avec les facteurs de caractérisation de cette étude – à 916 km parcourus seul en voiture, ou à 11 939 km en TGV. Autrement dit, la convention coûte au total à peu près un Paris-Marseille en voiture par participant·e. Une précaution de lecture est nécessaire concernant l'utilisation de l'eau. L'indicateur d'impact en eau d'`EF 3.1` (méthode AWARE) évalue le net d'eau réellement consommée, évaporée ou incorporée aux produits, et la pondère par la tension sur la ressource du bassin où elle est prélevée. Un·e habitant·e en France consomme environ 53 m^3 d'eau potable par an : les 154 m^3 équivalents par participant·e sont ainsi de l'ordre de trois années de cette consommation domestique. Cette eau n'est pas consommée uniquement pendant la convention mais aussi en amont, dans les chaînes de production. La **Figure 1** synthétise les résultats et la répartition par composante de ces deux catégories d'impact.

Le transport est le premier poste dans quinze catégories sur seize. Il porte par exemple 68 % du changement climatique, 86 % de la consommation d'énergie fossile et 91 % des rayonnements ionisants. Les autres postes changent de rang selon la catégorie d'impact considérée. Comme souvent en approche ACV, il est peu pertinent de se restreindre au seul changement climatique : l'hébergement pèse 16 % du changement climatique mais 30 % de la consommation d'eau, et l'alimentation 13 % du changement climatique mais 61 % de l'appauvrissement de la couche d'ozone. Le numérique est marginal dans toutes les catégories d'impact à l'exception des ressources minérales où il atteint 20 %.

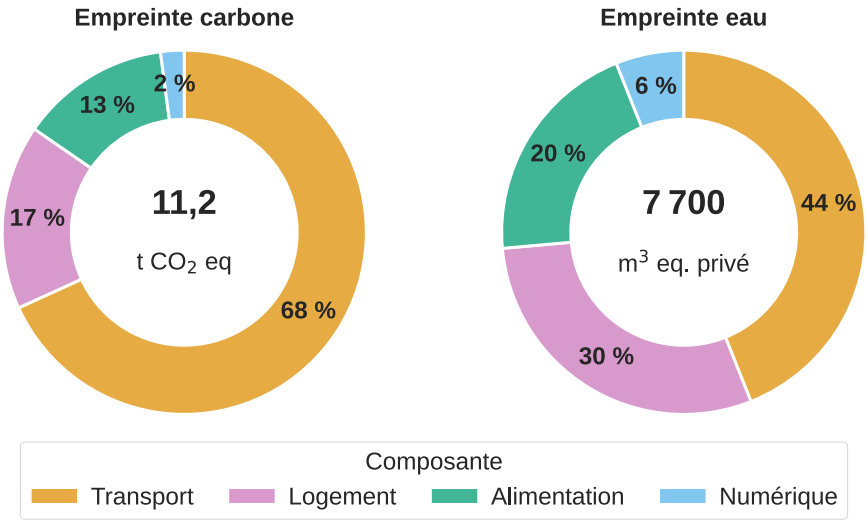


Figure 1. Totaux de la convention et répartition par composante, pour l'empreinte carbone et l'empreinte eau. Scénario conservateur pour l'alimentation. Les pourcentages sont arrondis à l'unité.

Le travail entre les weekends, entièrement en ligne, ne coûte que 0,5 % de l'empreinte carbone, quand un weekend en présentiel en représente 22 à 26 %. Il faut noter que le comité de pilotage a veillé dès le départ à minimiser les impacts environnementaux de la convention : le transport en train était le mode par défaut pour toutes et tous, avec quelques exceptions permises, tandis que l'alimentation proposée était systématiquement végétarienne. Ainsi, les résultats présentés dans ce rapport sont probablement proches du résultat optimal possible en France à l'heure actuelle, compte tenu des nécessités de toute organisation en pratique. Il peut y avoir des raisons légitimes menant à ne pas prendre le train, et quatre lieux d'accueil ont permis de répartir les temps de transport entre participant·es de façon plus juste qu'une organisation centralisée à Paris, en plus d'inscrire l'évènement dans la diversité des territoires. Des scénarios levant ces contraintes ont néanmoins été évalués : organiser les quatre weekends à Fontainebleau aurait réduit l'empreinte carbone de 18 %, remplacer tous les trajets en voiture évitables par le train de 23 %, et combiner les deux de 34 % – **Section 6.6**.

À contraintes d'organisation égales, les marges de progression restantes sont étroites, et détaillées en **Section 8**. Le premier levier, le nombre de weekends en présentiel, n'est en pratique pas mobilisable sans dénaturer la démarche délibérative. Restent la réduction du recours à la voiture individuelle, qui porte 28 % de l'empreinte carbone totale (pour peu de personnes concernées), l'intégration d'un critère de sobriété en eau dans le choix des lieux d'accueil et, plus marginalement, le choix des produits alimentaires.

Trois des seize catégories d'impact, celles de toxicité, sont peu exploitables en l'état – **Section 6.3**. La propagation d'incertitude sur les activités d'hébergement présente par ailleurs une anomalie sur quatre catégories – **Section 6.2**.

2 Objectifs et champ de l'étude

2.1 Objectifs et destinataires

L'étude a été réalisée par une partie du comité de pilotage de la Convention IESF sur les Connaissances, et poursuit trois objectifs. D'abord, quantifier l'empreinte environnementale complète d'un format de convention citoyenne de taille moyenne, dont les ordres de grandeur ne sont pas documentés. Ensuite, hiérarchiser les postes, afin de savoir où porter les éventuels efforts de réduction possibles pour les éditions suivantes des conventions organisées par IESF. Enfin, documenter la méthode de manière suffisamment explicite pour qu'elle soit reprise par d'autres organisateurices d'événements délibératifs, où la question de l'impact environnemental est éventuellement posée mais à notre connaissance jamais chiffrée ni publiée.

Les destinataires sont les autres membres du comité de pilotage, les participant·es, les instances d'IESF appelées à se prononcer sur la reconduction du format, et au-delà : toute personne intéressée par l'impact environnemental des processus de démocratie délibérative. L'étude n'est pas destinée à une déclaration environnementale comparative au sens de l'ISO 14044, et n'a donc pas fait l'objet d'une revue critique par un panel de parties intéressées, seulement des relectures internes au comité de pilotage.

2.2 Unité fonctionnelle et flux de référence

L'unité fonctionnelle retenue est :

> L'organisation et la tenue d'un cycle complet de convention délibérative, comprenant quatre weekends de travail en présentiel réunissant une cinquantaine de participant·es, le comité de pilotage et les expert·es auditionné·es, le travail en ligne entre les weekends, et le fonctionnement du comité de pilotage sur toute la durée du cycle, formation à la facilitation incluse.

Le flux de référence est ainsi une convention complète. Les résultats rapportés par participant·e utilisent l'effectif de référence de 50 participant·es fixé par l'objectif du processus. L'effectif en personnes ayant participé au processus est nécessairement supérieur, entre 50 et 65 personnes selon les weekends : cela inclut le comité de pilotage, les garant·es de la convention, les personnes intervenantes et les observateurices. De plus, certain·es participant·es ont été absent·es de certains weekends.

2.3 Frontières du système

Le système est modélisé comme un arbre à trois niveaux dans la base de données `IESF-Convention2025` définie dans `brightway`. La **Figure 2** en donne la structure complète. Le niveau 1 est la convention agrégée, le niveau 2 les huit étapes du cycle dont `Organisation Copil` qui est transversale d'un point de vue temporel, et le niveau 3 les activités élémentaires associées aux inventaires du cycle de vie. Seules ces activités élémentaires sont sommées : les activités agrégées ne servent qu'au contrôle de cohérence pour écarter tout double comptage.

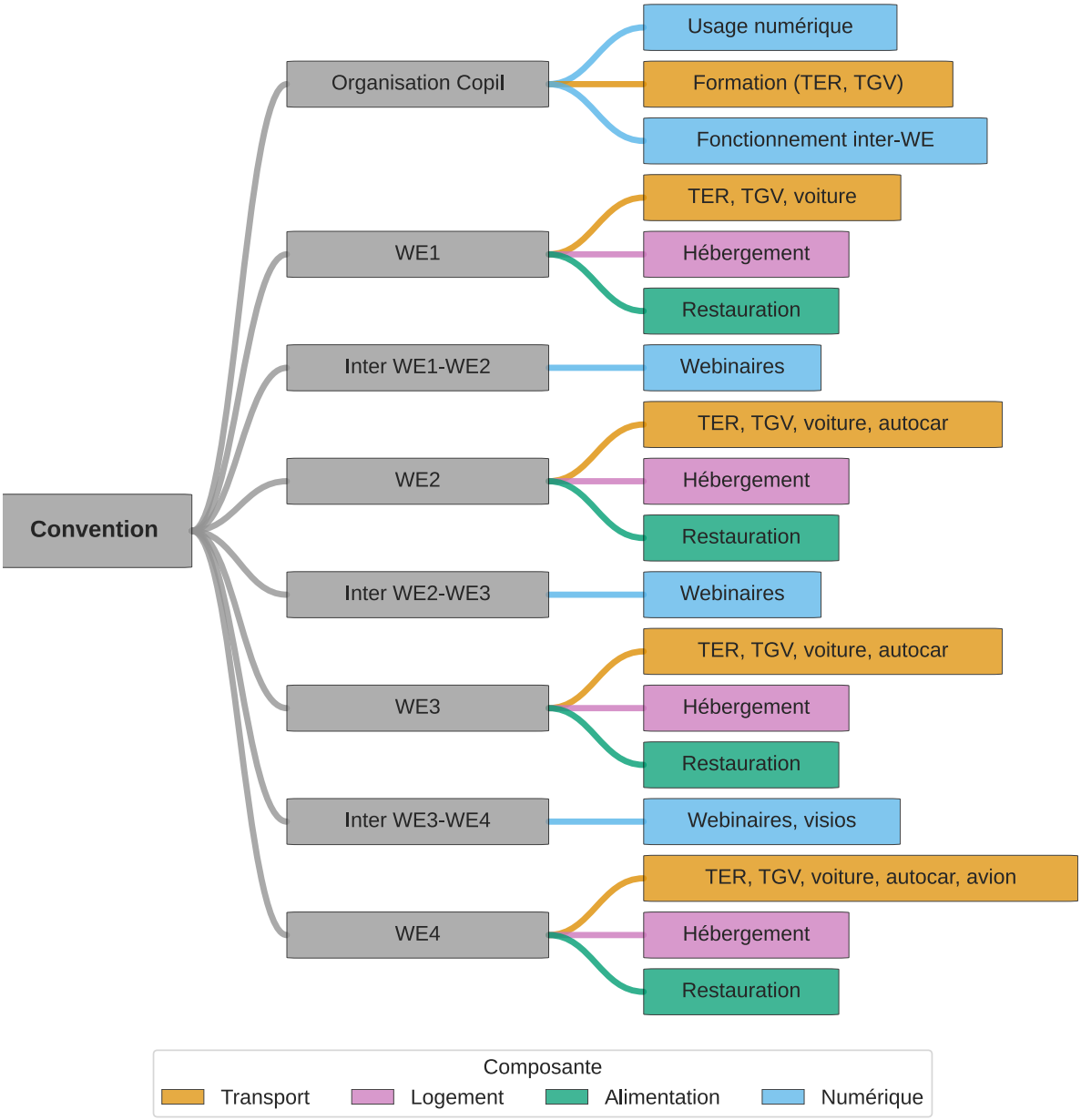


Figure 2. Arbre du système. La convention se décompose en huit étapes, chacune en activités élémentaires composant l'inventaire, colorées par composante agrégée.

2.4 Règle de coupure, exclusions et hypothèses

Le périmètre de l'étude couvre les déplacements, l'hébergement, la restauration et les usages numériques. Un flux est écarté lorsqu'il est raisonnable de considérer – ou qu'il nous est possible d'établir par une estimation

majorante – que ce flux pèse moins de 2 % du total de la convention sur le changement climatique, et qu'il n'est pas structurant sur une autre catégorie.

Trois éléments ont été écartés sur ces bases.

1. Les déplacements en transports en commun urbains, entre gares et lieux d'hébergement, sont exclus : leur distance est négligeable devant les trajets interurbains et leur estimation serait très imprécise.
2. La production d'imprimés, la convention ayant principalement fonctionné *via* des supports numériques.
3. Enfin, les salles de cours et amphithéâtres mis à disposition ont fait l'objet d'une estimation chiffrée. `ecoinvent 3.11` ne contient aucun flux d'exploitation de bâtiment universitaire ou de salle de conférence, seulement des hôtels, des auberges et des bureaux. Nous avons retenu une approche physique englobante, en appliquant à une surface d'environ 400 m², soit un amphithéâtre et trois salles de travail, une occupation de 20 heures par weekend, une puissance électrique de 15 W/m² et une puissance de chauffage de 50 W/m² sur trois weekends chauffés. Cela représente 480 kWh d'électricité et 4 320 MJ de chaleur sur l'ensemble du cycle, soit 174 kg CO_2 eq, 1,6 % du total de la convention, et moins encore sur la consommation d'eau. Le poste reste autour de 3 % du total même en doublant chacune des trois hypothèses.

Deux hypothèses structurent enfin la lecture des résultats. Les transports sont modélisés par des jeux de données de marché (`market`) d'`ecoinvent`, qui représentent le mix moyen des fournisseurs et des technologies d'un pays ou d'une région. Ils correspondent ainsi à la moyenne d'une flotte d'un moyen de transport, ce qui suppose une répartition représentative des motorisations et des taux de remplissage. Ce choix est la pratique recommandée lorsque le véhicule ou l'opérateur précis n'est pas connu, ce qui est notre cas. De plus, l'alimentation est encadrée par deux scénarios, le plus favorable et le plus défavorable, car plusieurs produits de la base `Agribalyse` peuvent correspondre à un même aliment facturé – cf. **Section 3.5**.

3 Inventaire du cycle de vie

3.1 Bases de données et cohérence des sources

L'inventaire mobilise deux sources de données en arrière-plan. Les transports, l'hébergement et les usages numériques sont rapportés à des jeux de données disponibles sur `ecoinvent 3.11 cutoff`, avec une priorisation de géographies dans l'ordre suivant : FR (France), RER (Europe), CH (Suisse), puis GLO (moyenne mondiale). L'alimentation est quant à elle rapportée à des jeux de données `Agribalyse 3.2`, via une table de correspondance construite pour l'étude. `Agribalyse` est construite sur `ecoinvent`, mais son importation dans `brightway` n'est actuellement pas bien supportée. Ainsi, nous utilisons le fichier `xlsx` officiel d'`Agribalyse 3.2`, qui fournit des scores d'impact déjà caractérisés par kilogramme de produit consommé, et non les inventaires raccordés à `ecoinvent`. La prise en compte des incertitudes associées à l'alimentation impose de calculer la distribution Monte-Carlo séparément, puis de sommer avec les distributions sur les résultats hors alimentation.

3.2 Transports

La **Figure 3** illustre les modes de transport et les liaisons empruntées lors des différentes étapes en présentiel de la convention, le dernier panneau affichant l'ensemble cumulé. L'épaisseur du trait y est proportionnelle à la racine du nombre de trajets et sa couleur donne le mode dominant de la liaison ; l'échelle étant commune aux six panneaux, une même épaisseur y représente le même nombre de trajets, ce qui rend directement comparable la portée géographique de chaque weekend. Le lieu d'accueil de chaque étape est cerclé et les gares sont figurées par un point, sans être nommées.

Notons deux conventions de lecture : le vol du quatrième weekend apparaît sous la forme de son allocation marginale, décrite plus bas : le vol prévu sans la convention, vers Rennes, en pointillé fin, le vol effectué vers Nantes en pointillé, et l'écart entre les deux, seul imputé à la convention, en trait plein. De plus, les navettes collectives des deuxième et troisième weekends ne sont pas représentées car non discernables sur les courtes distances concernées.

Le détail modal est disponible dans des exports séparés, un par weekend plus un pour les déplacements de formation du comité de pilotage. La somme des modes de chaque export reconstitue exactement la valeur de l'activité agrégée `transports, WEx`.

Cinq modes ont été utilisés : ils sont rapportés aux activités `ecoinvent` retenues et leur géographie dans le **Tableau 1**.

Libellé	Activité `ecoinvent 3.11`	Géo.
TER	transport, passenger, train, fleet average	FR
TGV	transport, passenger, train, electric high-speed	FR
Voiture	transport, passenger, car with internal combustion engine, fleet average	RER
Autocar	transport, passenger, coach, diesel	CH
Avion	transport, passenger, aircraft, medium haul	GLO

Tableau 1. Correspondance entre les modes de transport et les activités `ecoinvent` mobilisées.

3.2.1 Comptage des distances

Les inventaires des trois modes de transport principaux sont construits *via* trois méthodes de décompte différentes. Le comité de pilotage ayant réservé lui-même les billets de train, un outil a été développé pour l'étude afin de reconstruire les trajets réels gare par gare. Ce dernier, nommé `RailTrace`, part de la référence de voyage inscrite sur le billet, récupère auprès du transporteur le justificatif détaillé du déplacement, écarte les doublons de réservation, convertit les noms de gares en coordonnées par géocodage `OpenStreetMap`, puis calcule la distance le long du réseau ferroviaire. Il est possible de distinguer les trajets régionaux des trajets à grande vitesse et de répercuter cette différence dans le choix des activités dans la base `ecoinvent`. L'outil est publié sous licence libre à l'adresse indiquée en Références – **Section 12**.

L'approche par `RailTrace` a été contrôlée sur dix trajets couvrant 18 à 825 km, en comparant les résultats à trois services indépendants : `Eurovoyages`, `Google Maps` et `SNCF Connect`. Dans le cas de `Google Maps`, il a fallu utiliser l'outil de mesure de distances manuellement, en suivant les lignes ferroviaires. Trois valeurs de `SNCF Connect` ont été écartées car elles correspondaient à un itinéraire en réalité différent de celui effectivement emprunté – ligne classique contre ligne à grande vitesse – ce qui laisse 26 points de comparaison. De fait, les sources s'accordent : l'écart absolu moyen à l'outil `RailTrace` vaut 2,4 km et sa médiane 1,6 km. L'écart relatif décroît significativement avec la distance, alors que l'écart absolu reste stable. Utiliser une incertitude fixée par pourcentage conduirait à surestimer l'incertitude sur les courtes distances. Alternativement, une régression quantile au 95^{e} percentile nous permet d'obtenir une fonction d'incertitude sous la forme :

$$u(d) = 1{,}58 \ln(d) - 2{,}49 \quad [\text{km}] \tag{1}$$

où d est la distance parcourue en kilomètres. Cette fonction couvre 96 % des écarts observés et représente environ ± 2 km à 20 km et ± 8 km à 800 km. C'est cette dernière que nous utilisons pour quantifier l'incertitude sur toutes les distances ferroviaires de l'inventaire. La **Figure 4** illustre les écarts observés et la bande qu'elle définit.

Les trajets en voiture sont calculés porte à porte sur `Google Maps`, en itinéraire routier. Faute d'un jeu de comparaison équivalent à celui construit pour le ferroviaire, leur incertitude est fixée à 2 % de la distance, ordre de grandeur cohérent avec la dispersion observée entre différents calculateurs d'itinéraires.

3.2.2 Règles d'allocation

Lorsqu'une personne se trouvait déjà dans la ville d'un weekend pour des raisons autres que la convention, seul le trajet retour est compté. Les trajets en transports en commun urbains sont exclus, comme indiqué en **Section 2.4**, à l'exception des navettes affrétées pour la convention. En ce qui concerne le seul trajet aérien de toute la convention, la personne concernée devait rentrer par avion d'Amsterdam dans tous les cas. Seule la différence entre le vol effectué et celui qu'elle aurait pris autrement pour rentrer est imputée, soit 72,6 km sur un vol de 733,7 km.

Les distances de trajet par avion ont été relevées sur cinq calculateurs indépendants : `flightsfrom.com`, `AirMilesCalculator`, `airportdistancecalculator`, `fr.distance.to` et `dureeduvol.fr`. Amsterdam-Nantes, le vol effectué, ressort en moyenne à 733,66 km avec un écart de 3 km entre la valeur haute et la valeur basse ; Amsterdam-Rennes, le vol qui aurait été pris sans la convention, à 661,06 km avec le même écart de 3 km. La différence imputée vaut donc 72,60 km, et son incertitude, obtenue en propageant les deux écarts, 4,2 km.

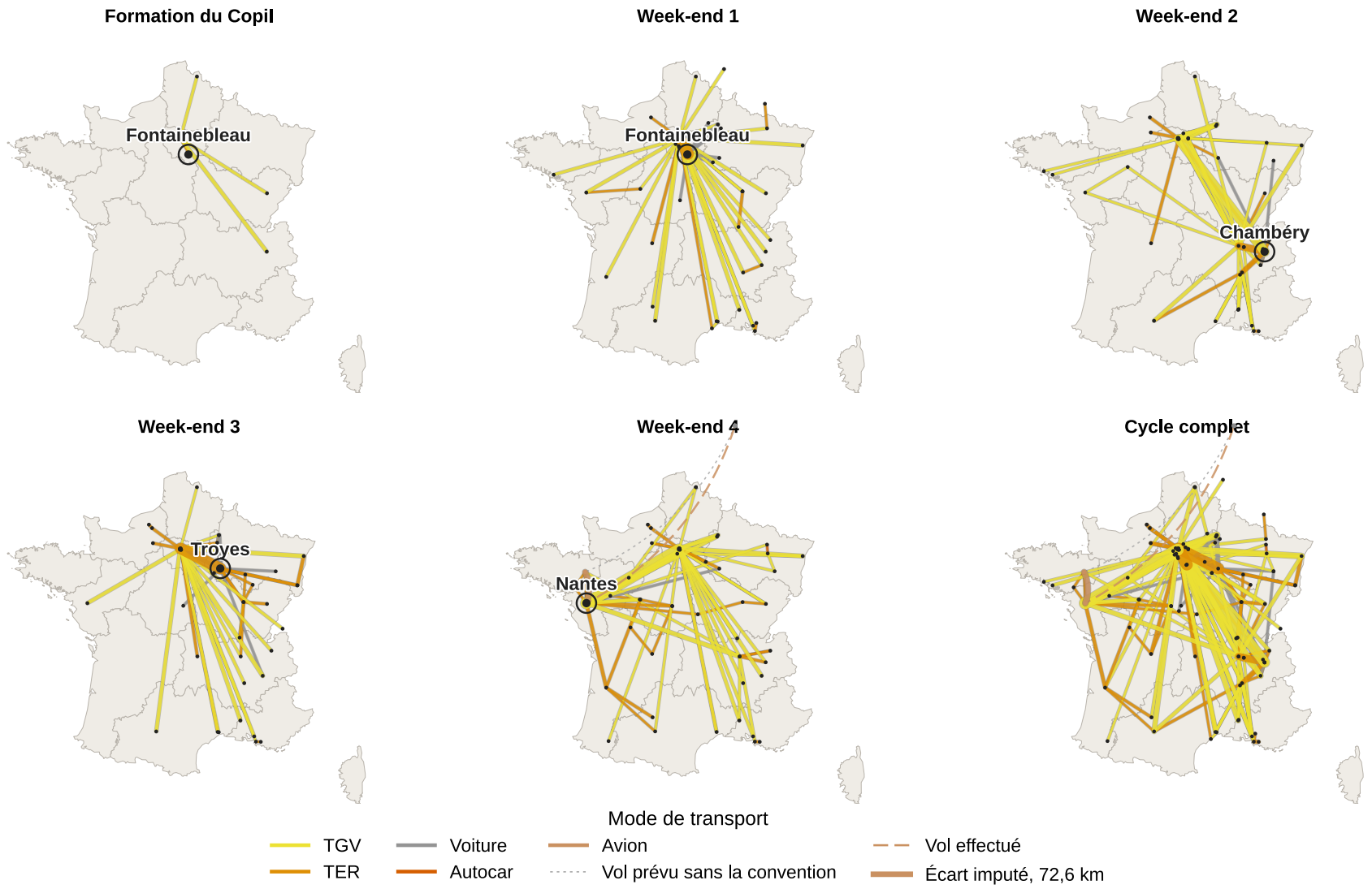


Figure 3. Flux de transport par étape du cycle, à échelle commune, le dernier panneau cumulant les cinq précédents.

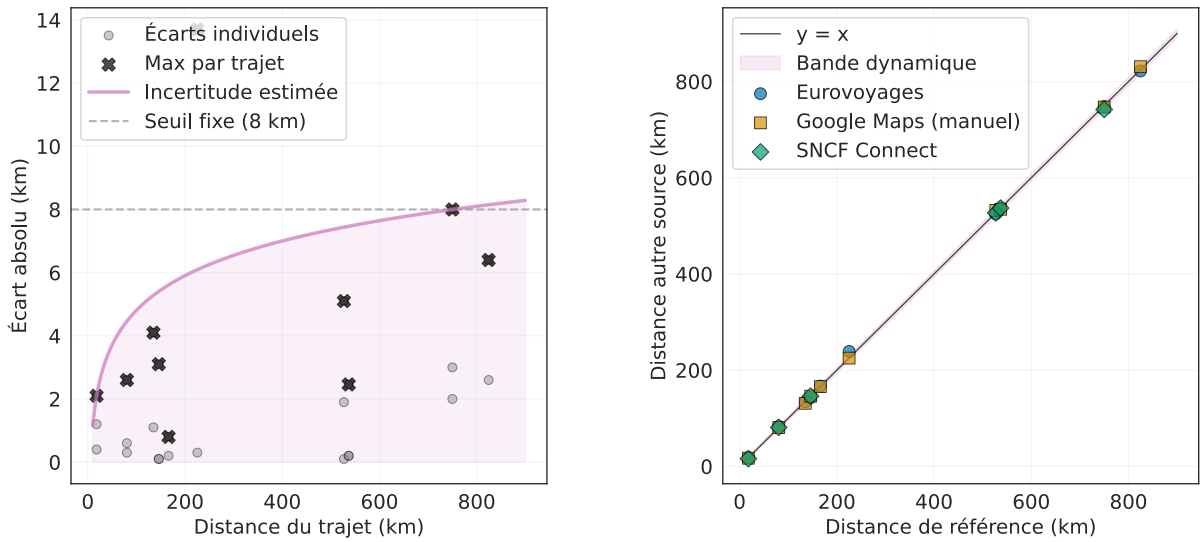


Figure 4. Contrôle des distances ferroviaires. À gauche, les écarts absolus entre l'outil et chacune des sources de comparaison, en fonction de la distance du trajet. Le seuil fixe de 8 km illustre la surestimation de l'incertitude aux courtes distances. À droite, les distances des trois sources reportées contre celles de l'outil, avec la bande d'incertitude correspondante.

3.3 Hébergement

L'hébergement est modélisé via l'adaptation de jeux de données `ecoinvent 3.11` exprimés en nuitées. Durant le premier, le troisième et le quatrième weekend, le logement était en hôtel budget, représentant 89, 102 et 97 nuitées. Pour le deuxième weekend, les effectifs étaient répartis entre un hôtel budget – 43 nuitées – et un internat – 56 nuitées – modélisé ici comme étant équivalent à une auberge de jeunesse. Ces deux types d'activités sont rapportés dans le **Tableau 2**.

Type d'hébergement	Activité	Géo.
Hôtel budget	building operation, budget hotel	FR
Auberge	building operation, hostel	FR

Tableau 2. Correspondance entre les types d'hébergement et les activités mobilisées. Toutes deux proviennent de la base d'adaptation décrite ci-dessous et non directement d'`ecoinvent`.

Notons qu'aucune de ces activités n'existe pour l'Europe ou un pays européen : `ecoinvent` ne fournit d'inventaire que pour le Brésil et le Pérou. Il n'est pas possible d'utiliser ces inventaires tels quels car cela ferait porter à la convention un mix électrique, de chaleur et un réseau d'eau bien différents de ceux des lieux d'accueil. Nous avons donc adapté les jeux de données en régionalisant les jeux de données brésiliens sans en modifier la structure. Les quantités sont reprises à l'identique, produit par produit : ni la consommation d'eau, ni celle d'électricité, ni les quantités de linge, de savon ou de papier ne sont retouchées. Seule change la provenance des marchés d'arrière-plan, réorientée vers le marché le plus proche disponible. La France est retenue chaque fois qu'un marché national existe, la Suisse ensuite, faute de marché français pour la chaleur, l'eau du réseau et le traitement des eaux usées et des déchets textiles, et l'Europe pour les deux marchés de matière. Une quinzaine d'entrées restent inchangées : ce sont des marchés d'équipement et de consommables déjà exprimés en géographie mondiale.

L'effet est loin d'être marginal. Pour le changement climatique, la nuitée en hôtel budget passe de 6,99 à 5,09 kg CO_2 eq, soit une baisse de 27 %, et la nuitée en auberge de 4,21 à 2,85 kg CO_2 eq, soit 32 %. Pour la consommation d'eau, la baisse est de 8 % pour l'hôtel et de 41 % pour l'auberge. L'essentiel vient du mix électrique : le kWh français est bien moins carboné que le kWh brésilien, dont la forte part d'hydroélectricité pèse de plus fortement sur la catégorie d'impact de consommation d'eau.

Cette adaptation reste une approximation. Elle corrige la géographie de l'arrière-plan mais laisse inchangés les usages décrits par le jeu de données brésilien, alors que les consommations d'eau et de linge d'un hôtel varient très largement d'un pays à l'autre et à l'intérieur d'un pays même. Nous avons confronté notre valeur obtenue

aux références publiées, et échangé avec l'équipe du calculateur `Impact CO2` de l'ADEME pour comprendre les écarts :

1. Les chiffres qui circulent ne sont pas tous de même nature. Par exemple, les 4,3 kg CO_2 eq par nuitée affichés par `Impact CO2` sont une intensité carbone du secteur touristique français sur une année donnée, tirée du bilan sectoriel 2022, et non un inventaire de cycle de vie. Une intensité carbone rapporte les émissions d'une année au volume d'activité de cette même année : elle bouge avec la fréquentation, à la hausse lors d'un évènement exceptionnel, à la baisse lors d'une crise sanitaire. Un inventaire de cycle de vie vise au contraire une moyenne théorique sur un temps long. Les deux grandeurs ne peuvent ainsi pas se comparer terme à terme.
2. `Impact CO2` inclut le déplacement domicile-travail du personnel, que le jeu de données `ecoinvent` ne contient pas. L'équipe le chiffre à environ 7 % de son résultat : ce poste peut expliquer une part de l'écart mais pas sa totalité.
3. Le reste tient vraisemblablement aux quantités elles-mêmes, en particulier aux consommations d'électricité et de chaleur, dont on peut raisonnablement penser qu'elles diffèrent en moyenne selon que l'on regarde un hôtel brésilien ou français.

Notre nuitée adaptée, à 5,09 kg CO_2 eq, se situe ainsi au-dessus de l'intensité carbone sectorielle et en dessous des 6,93 à 9,91 kg CO_2 eq du référentiel ADEME et des 7,7 kg CO_2 eq de l'indicateur HCMI, qui décrivent un hôtel moyen. L'ACV de Campos et al. 2024 sur trois hébergements de la péninsule ibérique, conduite avec la méthode EF 3.0 et les bases `ecoinvent` et `Agribalyse`, trouve de son côté 4,7 à 6,0 kg CO_2 eq par nuitée, petit-déjeuner compris. Notre valeur, dont le petit-déjeuner est exclu car compté avec l'alimentation, est du même ordre. Cette étude identifie en outre l'électricité et le combustible de chauffage comme premiers contributeurs, ce qui confirme la sensibilité de la nuitée au mix énergétique du pays.

3.4 Usages numériques

Les usages numériques se répartissent entre l'usage numérique du comité de pilotage, le fonctionnement inter-weekends, trois activités de webinaires entre deux weekends consécutifs, et enfin les visioconférences des conventionnel·les, essentiellement lors du travail sur le rapport entre les weekends 3 et 4. L'inventaire est comptabilisé en heures d'usage, obtenues en croisant le nombre de personnes connectées à une session avec sa durée.

Deux jeux de données `ecoinvent` suffisent à couvrir ces usages et sont documentés dans le **Tableau 3**. La principale différence se situe au niveau de la sollicitation du terminal et du réseau : une heure de visioconférence coûte ainsi davantage qu'une heure de travail ordinaire sur la même machine. Aucun de ces deux jeux de données n'existe en version FR ou RER : la géographie CH est donc retenue selon l'ordre de priorité défini en **Section 3.1**, la visioconférence n'étant par ailleurs disponible qu'en versions CH, CA-QC (Canada) et RoW (*Rest of World*).

Usage	Activité `ecoinvent 3.11`	Géo.
Travail ordinaire sur poste	operation, computer, laptop, active mode	CH
Visioconférence	operation, computer, laptop, videoconference	CH

Tableau 3. Correspondance entre les usages numériques et les activités `ecoinvent` mobilisées.

3.5 Alimentation

L'inventaire alimentaire est construit à partir des factures des traiteurs. Leurs 56 lignes de prestation, réparties sur les quatre weekends et six types de repas, sont décomposées en 104 produits élémentaires, soit 169 occurrences une fois rapportées par weekend et repas, que nous avons converties en masses par personne puis associées à des références `Agribalyse`. Les factures donnent en effet des prestations et des prix, très rarement des masses. La conversion combine plusieurs approches.

Lorsque cela était possible, nous avons utilisé GEMRCN, la recommandation nutrition du groupe d'étude des marchés en restauration collective, dans sa version de juillet 2015. Ses annexes donnent des grammages de portion par classe de convive ; nous retenons la colonne « adolescents, adultes ». Elle couvre l'entrée, le plat, la garniture, le dessert, le pain et les boissons du petit-déjeuner, soit 41 % de la masse alimentaire de

l'inventaire. La seconde est constituée de diverses hypothèses *ad hoc* de notre part, pour tout ce que GEMRCN ne couvre pas : les mignardises, les pièces cocktail, les planches à partager et l'apéritif dînatoire. Ces hypothèses sont documentées ligne à ligne dans l'inventaire, accompagnées du raisonnement utilisé. Les contenances des formats de bouteilles – 33 cL pour les petits formats, et 75 cL pour les bouteilles de vin – et les dosettes de sucre – 5 g – suivent les standards commerciaux.

Chaque masse porte enfin une incertitude fixée par le niveau de confiance de l'estimation. Le coefficient de variation évolue de 0,10 lorsque la facture donne la quantité à 0,35 lorsque la composition du repas est déduite du budget par personne. Quatre flux reçoivent une incertitude plus large en reprenant une borne connue : le pain ; les féculents en accompagnement ; les jus du petit-déjeuner ; ainsi que les légumes cuits, dont la portion retenue se situe sous la fourchette adulte du GEMRCN. Leur coefficient de variation est choisi de sorte que la borne haute du GEMRCN tombe au 95^{e} percentile de la distribution de masse, soit 0,81 pour le pain et le féculent, 0,19 pour le jus et 0,14 pour les légumes cuits. L'intervalle couvre ainsi l'ensemble des portions plausibles pour ces quatre postes.

Notre construction d'inventaire est soumise à deux contrôles :

- La somme des masses, rapportée à l'effectif et à un jour et demi de restauration par weekend, donne 1,9 à 3,2 kg par personne et par jour, boissons comprises. À titre de comparaison, la ration adulte moyenne mesurée dans l'étude INCA 3 était de 3,1 kg.
- L'élargissement concernant les portions, décrit au paragraphe précédent, augmente la largeur de l'intervalle de confiance du total de moins de 2 % sur les catégories où l'alimentation pèse le plus. Il n'influence donc que peu les conclusions de l'étude.

L'association et le calcul sont réalisés *via* un second outil développé pour l'étude, `AgribalyseAutoderive`. Cet outil peut traiter n'importe quel inventaire alimentaire respectant son format d'entrée sans qu'aucun arbitrage manuel soit nécessaire. Il enchaîne quatre étapes :

1. Lecture : Un inventaire normalisé est donné en entrée, avec une ligne par produit élémentaire, sa masse et son niveau de confiance. Les colonnes de contexte, ici le weekend et le type de repas, sont conservées et servent à regrouper les résultats.
2. Association : Le produit est rapproché des références `Agribalyse`. Les codes candidats peuvent être fournis dans l'inventaire, mais ce n'est pas nécessaire : à défaut, l'outil recherche par mots-clés, en correspondance exacte ou approchée, avec tolérance quant aux fautes de frappe et à l'ordre des mots.
3. Encadrement : Lorsque plusieurs références sont plausibles, l'outil ne tranche pas. Les scores environnementaux sont calculés pour chaque candidat, et deux scénarios sont construits en retenant systématiquement le candidat de plus faible vs. de plus fort score EF.
4. Propagation : L'incertitude est propagée par simulation de Monte-Carlo, en combinant deux sources indépendantes : la qualité de la donnée `Agribalyse 3.2`, traduite par son indicateur de qualité des données – DQR, pour *Data Quality Rating*, de 1 pour une donnée excellente à 5 pour une donnée très faible –, et l'incertitude de la masse estimée, déduite du niveau de confiance.

L'outil `AgribalyseAutoderive` a été contrôlé sur un inventaire construit de toutes pièces, indépendant de l'étude, dont les résultats attendus ont été recalculés à la main depuis la base `Agribalyse 3.2` puis comparés aux sorties, produit par produit et indicateur par indicateur. Sauf mention contraire, les résultats présentés dans la suite de ce document retiennent le scénario Pire impact, dans une approche conservatrice. L'écart entre les deux scénarios Alimentation est analysé en **Section 6.5**.

3.6 Traitement de l'incertitude

En plus des incertitudes sur les flux d'inventaire (avant-plan) déjà traitées dans les sections précédentes, il faut ajouter l'incertitude issue des sources de données en arrière-plan. Les activités modélisées sur `ecoinvent` portent les distributions natives de la base. Pour l'alimentation, dont les impacts viennent de scores déjà caractérisés, la qualité de la donnée `Agribalyse` est traduite par son indicateur DQR.

La propagation des incertitudes est faite dans les deux cas par simulation de Monte-Carlo à 1 000 itérations, nombre suffisant au vu de la stabilisation de la médiane cumulée vérifiée en **Section 6.1**. Les tirages sont conservés activité par activité, ce qui permet de recomposer la distribution de n'importe quel agrégat sans réexécuter la simulation.

4 Méthode d'évaluation des impacts

4.1 Catégories d'impact et classes de robustesse

La méthode de caractérisation retenue est `Environmental Footprint 3.1`, composée de seize catégories d'impact – niveau dit *midpoint*. Chaque indicateur d'une catégorie d'impact est classé en termes de robustesse : de I pour les indicateurs les mieux établis à III pour ceux dont les facteurs de caractérisation restent affectés d'une forte incertitude méthodologique. Cette classification conditionne l'interprétation : ainsi, dans cette étude, les catégories de classe III ne sont pas utilisées pour appuyer une recommandation. Nous calculons les seize indicateurs et publions tous les résultats par transparence.

Notons que trois d'entre eux, les indicateurs de toxicité, se révéleront inexploitables : la simulation d'incertitude y produit des résultats trop dispersés, positifs comme négatifs, pour être interprétés. Le diagnostic complet est établi en **Section 6.3**, après présentation de l'ensemble des résultats d'incertitude. En pratique, l'analyse porte donc sur treize catégories. Le **Tableau 4** récapitule ces choix méthodologiques.

Classe	Catégories	Statut dans l'étude
I	Changement climatique, énergie fossile, appauvrissement de la couche d'ozone	exploitées
II	Acidification, eutrophisations marine et terrestre, rayonnements ionisants, occupation des sols, particules, ozone photochimique, consommation d'eau	exploitées
III	Écotoxicité d'eau douce, toxicité humaine cancérogène et non cancérogène, eutrophisation d'eau douce, ressources minérales	publiées, non interprétées

Tableau 4. Répartition des seize catégories `EF 3.1` par classe de robustesse et statut retenu dans l'étude.

4.2 Simulation Monte-Carlo

Une simulation Monte-Carlo consiste à recalculer l'impact un grand nombre de fois en tirant à chaque fois au hasard chaque donnée d'inventaire dans sa plage d'incertitude. On obtient une distribution de résultats possibles plutôt qu'une valeur unique. Les 1 000 itérations produisent, pour chaque catégorie, une distribution du total de la convention dont on retient la médiane et l'intervalle interpercentile 5-95 %, noté ici IC 90 %. L'IC 90 % contient 90 % des résultats simulés : on exclut les 5 % de tirages les plus bas et les 5 % de tirages les plus hauts, de façon à écarter les valeurs extrêmes, qui peuvent être aberrantes. La convergence de la médiane cumulée a été vérifiée graphiquement pour chaque catégorie – **Figure 9**.

4.3 Test de distinguabilité

Comparer deux distributions par le seul recouvrement de leurs intervalles peut trop souvent conclure à l'indistinguabilité. Ici, nous utilisons la taille d'effet en langage commun – CLES – définie comme la probabilité qu'un tirage de la distribution A dépasse un tirage de la distribution B :

$$\mathrm{CLES}(A,B) = P(A > B), \quad \mathrm{CLES}_{\mathrm{sym}}(A,B) = \max(\mathrm{CLES}(A,B), \mathrm{CLES}(B,A)) \tag{2}$$

Une catégorie est alors déclarée distinguable dès qu'au moins une paire de composantes atteint un CLES symétrisé supérieur ou égal à 0,75. Ce test est appliqué en **Section 6.4** pour déterminer si les composantes – transport, hébergement, alimentation – se distinguent réellement compte tenu des incertitudes, la **Figure 10** en donnant les résultats.

5 Résultats

L'analyse de contribution s'appuie sur les valeurs déterministes, dont la somme reconstitue exactement le total. Ce n'est pas le cas des médianes de Monte-Carlo : la médiane est la valeur qui sépare les tirages en deux moitiés, et la somme des médianes du transport, de l'hébergement et de l'alimentation n'est pas la médiane du total. Les médianes et les intervalles de confiance sont analysés en détail en **Section 6**. Toutes les figures sont produites par le `Jupyter notebook` compagnon et reprises telles quelles.

5.1 Totaux par catégorie d'impact

Le **Tableau 5** rassemble les seize valeurs d'impacts totaux de la convention, en valeur déterministe et en médiane de distribution de Monte-Carlo. Ces dernières restent proches pour les catégories de classe I et II : l'écart y dépasse rarement 20 %, et la direction de l'écart s'explique par la propagation lognormale des incertitudes d'`ecoinvent` – cf. **Section 6.2**. Les trois catégories de toxicité font exception : l'IC 90 % traverse zéro sur plusieurs ordres de grandeur. C'est un premier élément argumentant contre l'exploitation de ces valeurs, approche confirmée en **Section 6.3**.

Nous commenterons principalement deux catégories dans la suite. Le changement climatique, parce qu'il est le plus lu et le mieux établi. Et la consommation d'eau, 7 688 m³ équivalents mondiaux privés, parce qu'elle est encore peu commentée dans les bilans d'événements et qu'elle fait pourtant apparaître une hiérarchie de contributions différente.

Catégorie	Unité	Rob.	Détermin.	Médiane MC	IC 90 %
Acidification	mol H+ eq	II	63,31	70,01	62,2 à 79,6
Climate Change	kg CO2 eq	I	11 237	10 800	9 532 à 12 386
FW Ecotoxicity	CTUe	III	92 103	79 630	−1 697 480 à 1 811 490
Fossil Energy	MJ	I	314 190	345 380	246 057 à 528 043
FW Eutrophication	kg P eq	III	3,084	3,602	2,12 à 6,47
Marine Eutrophication	kg N eq	II	25,22	17,93	14,4 à 21,2
Terr. Eutrophication	mol N eq	II	191,9	205,7	184 à 233
HT Carcinogenic	CTUh	III	$6{,}14\cdot10^{-6}$	$5{,}87\cdot10^{-5}$	−0,0550 à 0,0565
HT Non-Carcinogenic	CTUh	III	$2{,}15\cdot10^{-4}$	−0,01003	−6,61 à 6,67
Ionising Radiation	kBq U235 eq	II	9 809	11 014	3 971 à 64 287
Land Use	dimensionless	II	222 586	243 779	197 765 à 310 373
Material Resources	kg Sb eq	III	0,2193	0,2554	0,198 à 0,340
Ozone Depletion	kg CFC-11 eq	I	$3{,}87\cdot10^{-4}$	$4{,}11\cdot10^{-4}$	$3{,}77\cdot10^{-4}$ à $4{,}56\cdot10^{-4}$
Particulate Matter	disease incidence	II	$9{,}17\cdot10^{-4}$	0,001087	$9{,}00\cdot10^{-4}$ à 0,00144
Photochem. Oxidant	kg NMVOC eq	II	49,99	55,74	48,2 à 66,4
Water Use	m³ world eq deprived	II	7 688	8 238	6 588 à 10 941

Tableau 5. Impacts totaux de la convention, scénario alimentaire Pire impact. « Rob. » est la classe de robustesse `EF 3.1`. L'IC 90 % est l'intervalle interpercentile 5-95 % des 1 000 tirages de Monte-Carlo.

5.2 Contribution par composante

La **Figure 5** donne la part de chaque composante dans le total, catégorie par catégorie, et l'incertitude qui s'y attache. Le panneau du haut donne la part déterministe de chaque composante c dans la catégorie i où $v_{c,i}$ est la valeur déterministe de la composante, somme des activités élémentaires qui la constituent :

$$s_{c,i} = \frac{v_{c,i}}{\sum_{c'} v_{c',i}} \times 100 \tag{3}$$

Le panneau du bas donne la largeur de l'intervalle de confiance à 90 % de cette même part, calculée tirage par tirage sur la simulation de Monte-Carlo, exprimée en pourcentages :

$$w_{c,i} = P_{95}\left(s^{MC}_{c,i}\right) - P_5\left(s^{MC}_{c,i}\right), \quad s^{MC}_{c,i} = \frac{v^{MC}_{c,i}}{\sum_{c'} v^{MC}_{c',i}} \times 100 \tag{4}$$

Rapporter une part sans cette largeur peut induire en erreur, car deux parts égales peuvent être établies très inégalement : une part faible assortie d'un intervalle large signale une composante dont la contribution est mal établie.

Sur le changement climatique, le transport vaut 68,2 % pour une largeur de 10,7 % seulement : la domination du transport est ainsi très claire. Dans le même genre, l'alimentation vaut 60,5 % de l'appauvrissement de la couche d'ozone pour 10,1 %. Inversement, pour l'eutrophisation d'eau douce, l'hébergement pèse 18,3 % pour une largeur de 32,4 %, soit une valeur plus grande que la part elle-même. Dans ce cas, on peut dire que la valeur de la contribution est faiblement établie.

Quelques points principaux peuvent être dégagés des résultats présentés sur ces deux sections :

- Le transport domine globalement avec quelques variations. Il constitue le premier poste dans quinze des seize catégories, et sa part ne descend jamais en dessous de 30 %.
- L'alimentation est le premier responsable dans la seule catégorie où le transport ne l'est pas – appauvrissement de la couche d'ozone – et avec lui explique presque entièrement l'impact sur l'occupation des sols ou l'eutrophisation terrestre, tout en étant minoritaire dans le changement climatique.
- L'hébergement / logement se comporte avant tout comme un poste « eau » : sa contribution n'approche les 30 % que sur les catégories de la consommation d'eau et de l'eutrophisation marine.
- La contribution du numérique est globalement marginale ; l'exception étant la consommation de ressources minérales à 20 %.

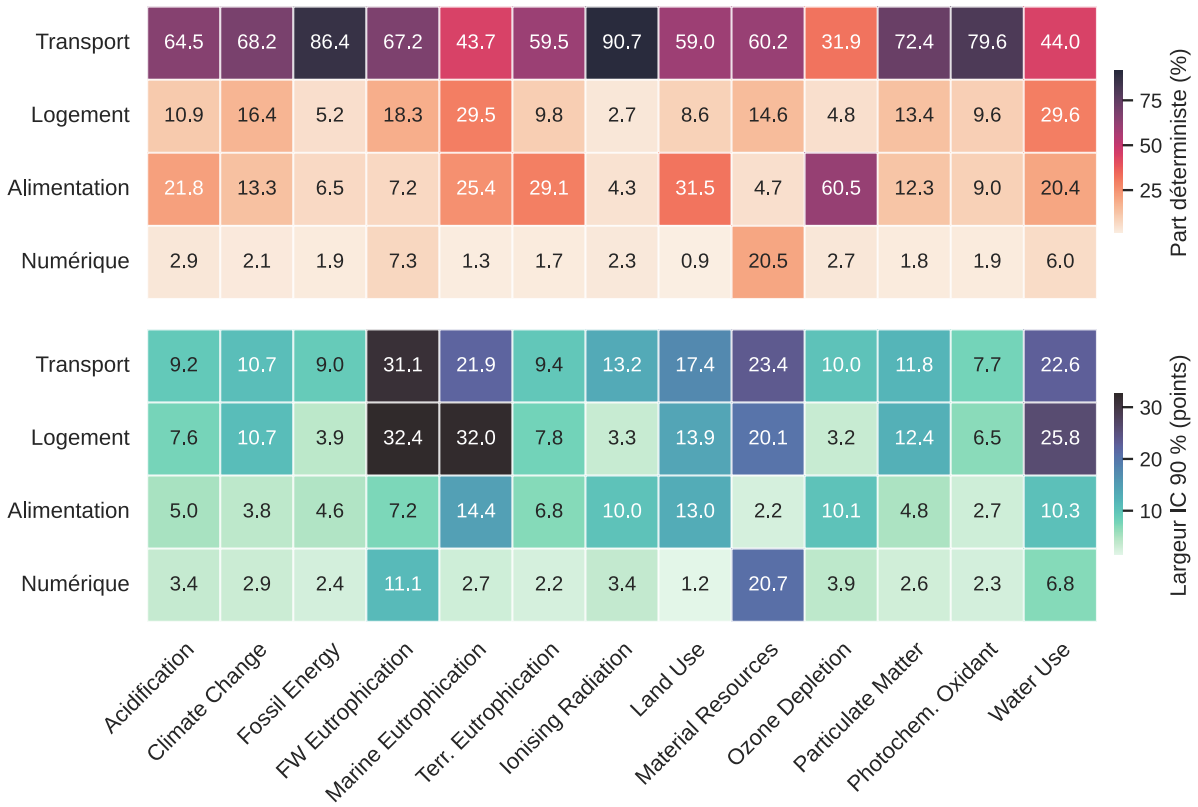


Figure 5. En haut, la part de chaque composante dans le total de la convention, pour les treize catégories distinguables au sens de la **Section 4.3**. En bas, la largeur de l'intervalle de confiance à 90 % de cette part, en pourcentage.

5.3 Contribution par étape du cycle

La **Figure 6** décompose chaque catégorie d'impact en marches successives, une par étape du cycle. La forme de l'escalier est la même dans les seize panneaux : quatre marches hautes, celles des weekends, séparées par trois paliers presque plats, ceux des inter-weekends. Les quatre weekends portent l'essentiel de l'empreinte et se ressemblent : de 2 492 à 2 893 kg CO_2 eq, soit 22 à 26 % du total chacun. Le comité de pilotage, formation à la facilitation comprise, pèse 2,4 % de l'impact changement climatique.

La composition interne des marches, donnée par les couleurs, peut en revanche varier significativement d'une catégorie à l'autre. Sur le changement climatique et l'énergie fossile, le TGV (jaune) et la voiture (gris) occupent la plus grande partie de chaque marche. Concernant l'appauvrissement de la couche d'ozone, c'est l'alimentation (vert) qui domine, représentant plus des deux tiers. Sur les ressources minérales, la première marche, celle de l'organisation, est très nettement associée au numérique (bleu) qui ici pèse plus que partout ailleurs.

Enfin, il faut remarquer que les trois inter-weekends cumulés représentent 50,6 kg CO_2 eq, soit 0,45 % du total.

> En moyenne, un weekend physique coûte 162 fois plus qu'une séquence de travail en ligne. Cet écart est le seul de cette amplitude dans toute l'étude.

5.4 Détail modal du transport

La **Figure 7** reprend la même lecture en marches pour le seul transport, weekend par weekend et mode par mode. Les quatre weekends n'ont pas la même répartition modale. Le premier weekend est dominé par la voiture (gris), le quatrième par le TGV (jaune) : 55 % de l'empreinte carbone du transport au premier contre 68 % pour le TGV au quatrième. La géographie explique l'essentiel : proche de Paris, Fontainebleau a suscité davantage de trajets courts en voiture, en covoiturage ou pour raisons de santé, tandis que Nantes, plus éloignée pour la plupart des participant·es mais directement desservie en TGV, a été rejointe presque exclusivement en train.

Pour le changement climatique, TGV et voiture totalisent 56 % de l'empreinte carbone totale de la convention. Le TGV pèse en outre 75 % des impacts en consommation d'eau du transport, ce dernier représentant 44 % de la consommation d'eau de la convention – contre 30 % pour l'hébergement. L'analyse de contribution du jeu de données ferroviaire attribue cette eau aux deux tiers à la production d'électricité, 52 % au nucléaire et 15 % à l'hydroélectricité de montagne, le flux en cause étant de l'eau émise vers l'air, c'est-à-dire évaporée aux tours de refroidissement et à la surface des retenues. Reporter les déplacements de la voiture vers le TGV réduit donc l'impact sur le changement climatique au prix d'une augmentation des impacts sur la consommation d'eau.

Le comité de pilotage ayant tout fait pour éviter le recours à l'aérien, l'avion n'apparaît ainsi qu'au quatrième weekend, en lien avec une personne auditionnée. Il représente 8,0 kg CO_2 eq alloués à la convention, soit une contribution négligeable.

> Notons que la voiture ne représente que 6 % des voyageurs-kilomètres des quatre weekends mais 41 % du coût carbone du transport : son poids tient à son facteur d'émission, non à la distance parcourue. Son usage a fortement reculé au fil de la convention, ce qui explique la forme de la **Figure 7** : elle a servi à 39 % des participant·es au premier weekend, 16 % au deuxième, 23 % au troisième et seulement 2 % au quatrième, toujours sur la totalité du trajet. La stabilité du **Tableau 6** vient d'une compensation entre distance, part de la voiture et effectif : Fontainebleau cumule la plus forte part de voiture, la distance la plus courte, 706 km par personne, et le plus faible effectif, 51 personnes ; Nantes, 1 302 km par personne, est rejointe presque uniquement en train. Par personne présente, le transport d'un weekend varie ainsi de 30,8 à 36,5 kg CO_2 eq.

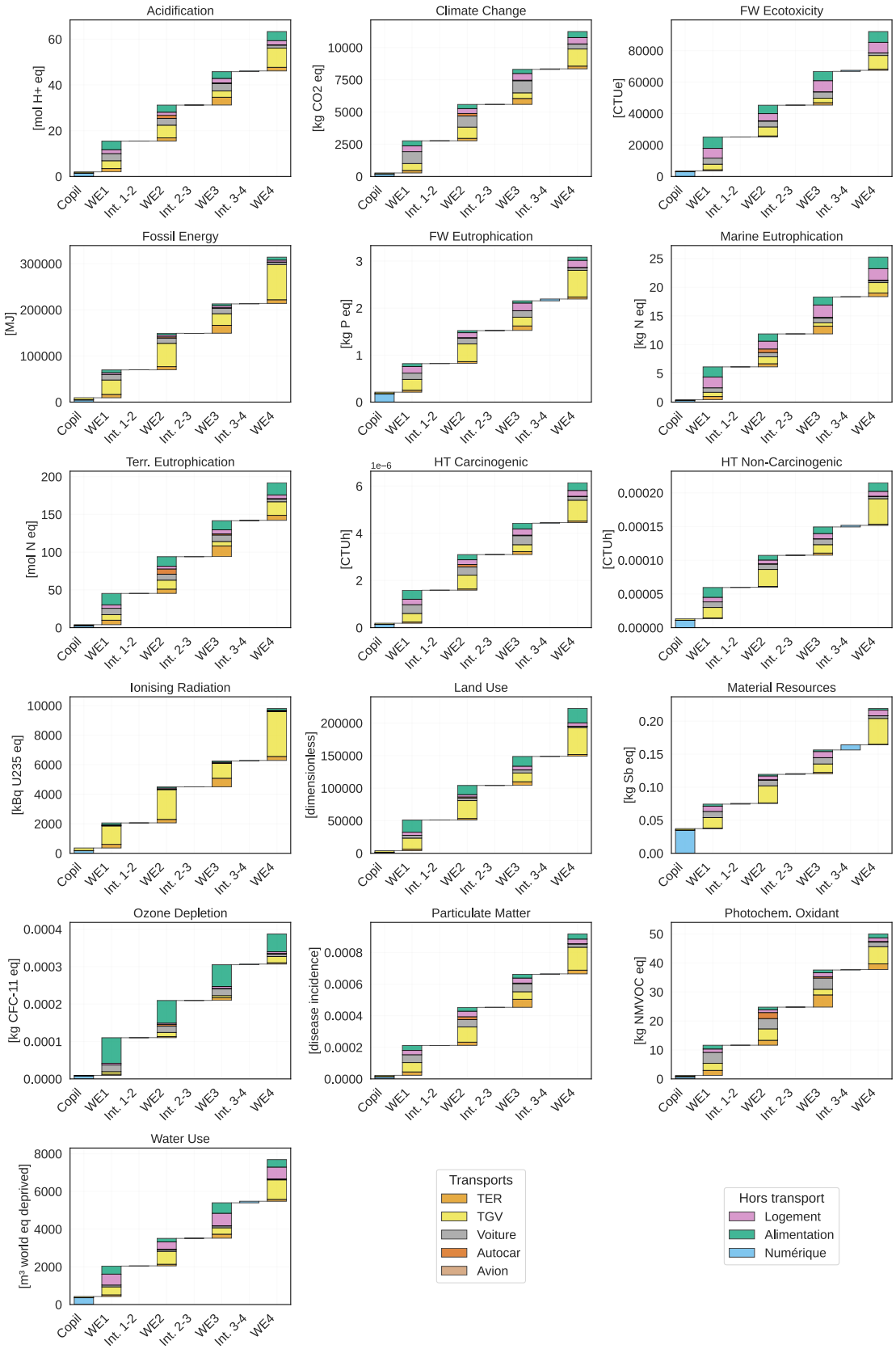


Figure 6. Graphique en cascade cumulatif de la convention pour les seize catégories d'impact. Lecture : chaque marche est une étape du cycle, la hauteur atteinte au bout à droite de chaque panneau est le total de la catégorie, tandis que les couleurs à l'intérieur d'une marche représentent les sous-processus qui la composent.

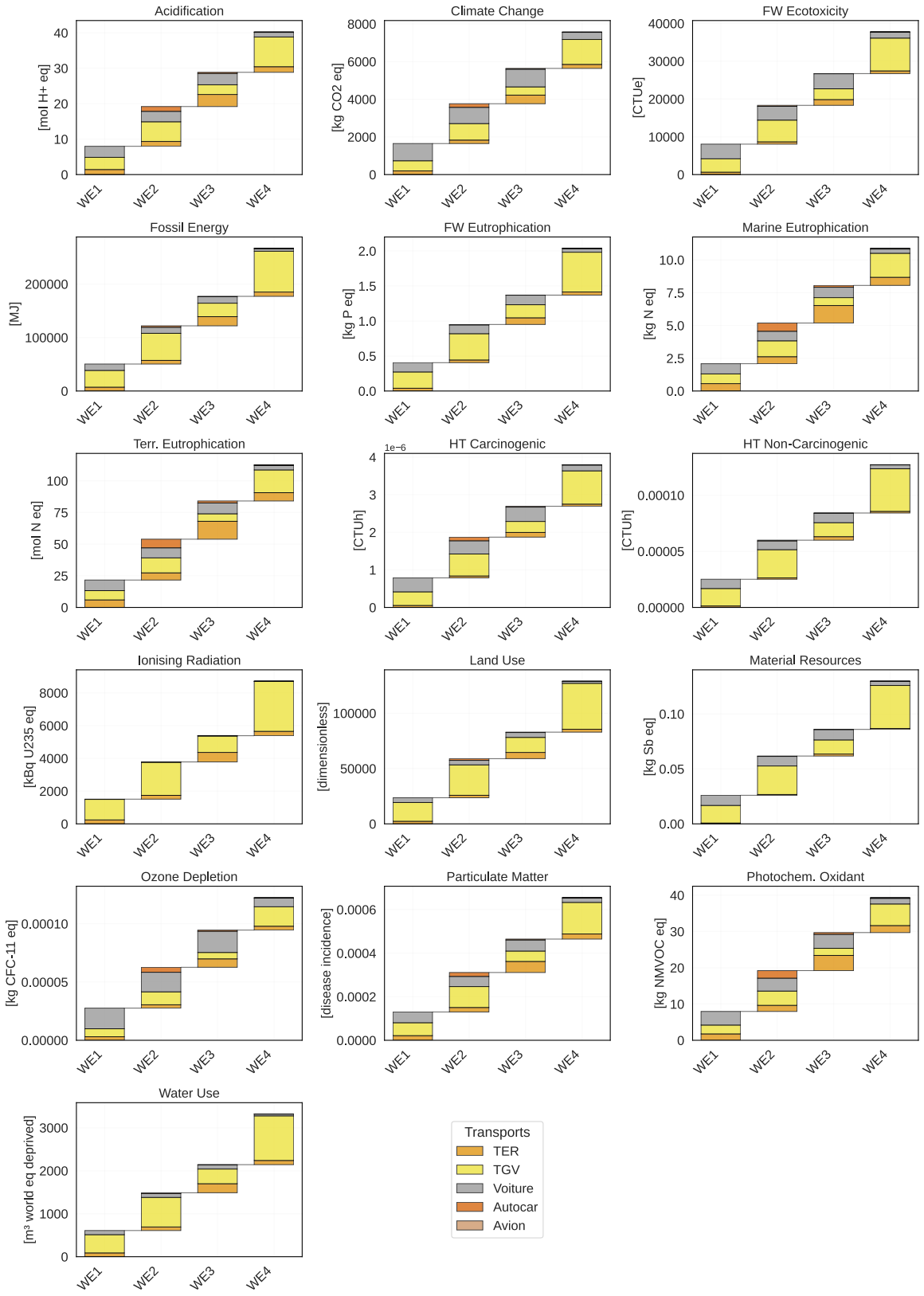


Figure 7. Graphique en cascade cumulatif du seul transport, weekend par weekend et mode par mode, pour les seize catégories d'impact. Les déplacements de formation du comité de pilotage sont négligés. Lecture : chaque marche est une étape du cycle, la hauteur atteinte au bout à droite de chaque panneau est le total de la catégorie, tandis que les couleurs à l'intérieur d'une marche représentent les sous-processus qui la composent.

	Changement climatique (kg CO_2 eq)				Consommation d'eau (m^3 eq. mond. privé)			
	Transp.	Logem.	Alim.	Total	Transp.	Logem.	Alim.	Total
WE1	1 648	453	391	2 492	609	582	425	1 616
WE2	2 115	378	322	2 815	879	392	186	1 457
WE3	1 876	519	320	2 715	653	667	555	1 876
WE4	1 936	494	463	2 893	1 176	635	399	2 210

Tableau 6. Décomposition des quatre weekends pour les deux catégories d'impact sélectionnées. Valeurs déterministes, scénario Pire impact pour l'alimentation.

5.5 Comparaison entre weekends

Le **Tableau 6** décompose les quatre weekends par composante, pour les deux catégories d'intérêt sélectionnées, changement climatique et consommation d'eau. Les quatre weekends sont homogènes en coût carbone mais nettement moins sur l'eau, où l'écart entre le weekend le plus sobre et le plus intense atteint un facteur proche de 1,5. Cette dispersion vient du transport et de l'hébergement, non de l'alimentation, dont la variation d'un weekend à l'autre reste contenue.

La **Figure 8** complète cette lecture en valeurs déterministes par les distributions de Monte-Carlo correspondantes, permettant d'ajouter la visualisation de la largeur des distributions de résultats. Trois choses peuvent s'y lire. Les distributions du transport sont nettement décalées de celles de l'hébergement et de l'alimentation dans presque toutes les catégories, ce qui confirme très nettement la hiérarchie établie plus haut sans dépendre du choix d'un point de la distribution. Les distributions de résultats pour l'alimentation sont les plus resserrées des trois activités principales représentées sur le graphique : ses quatre weekends se ressemblent fortement et son incertitude propre est plutôt faible. Pour l'hébergement, à l'inverse, les distributions de résultats s'étalent parfois largement et surtout descendent sous zéro dans plusieurs catégories, ce qui renvoie à l'anomalie de propagation documentée en **Section 6.2**.

6 Incertitude, cohérence et sensibilité

6.1 Convergence de la simulation

Une simulation de Monte-Carlo est utile si et seulement si le nombre de tirages permet de stabiliser la distribution de valeurs que l'on en tire. Le contrôle de convergence consiste à recalculer la médiane après chaque tirage supplémentaire et à suivre son évolution. Si elle continue de dériver pour un nombre d'itérations donné : soit il y a un problème dans le modèle sous-jacent, soit le nombre d'itérations est trop faible et la distribution obtenue dépend du hasard du tirage. La **Figure 9** permet de visualiser cette médiane cumulée, normalisée par la médiane finale de chaque catégorie de façon à rendre les seize catégories d'impact comparables.

Les treize indicateurs de classe I et II se stabilisent dans une bande de quelques pour cent bien avant la millième itération. Ce n'est pas le cas des trois indicateurs de toxicité. C'est le premier signe de leur non-exploitabilité, confirmé en **Section 6.3**.

Le transport se comporte comme attendu. Son rapport est compris entre 1,09 et 1,21 pour les treize catégories de classe I et II, un décalage de la médiane vers le haut tout à fait régulier et explicable par la propagation lognormale. Un seul tirage négatif apparaît, pour l'indicateur de toxicité humaine non cancérigène. L'alimentation se tient entre 0,98 et 1,00 : ses distributions restent centrées sur la valeur déterministe, la propagation ne les décale pas, et aucun tirage négatif n'apparaît.

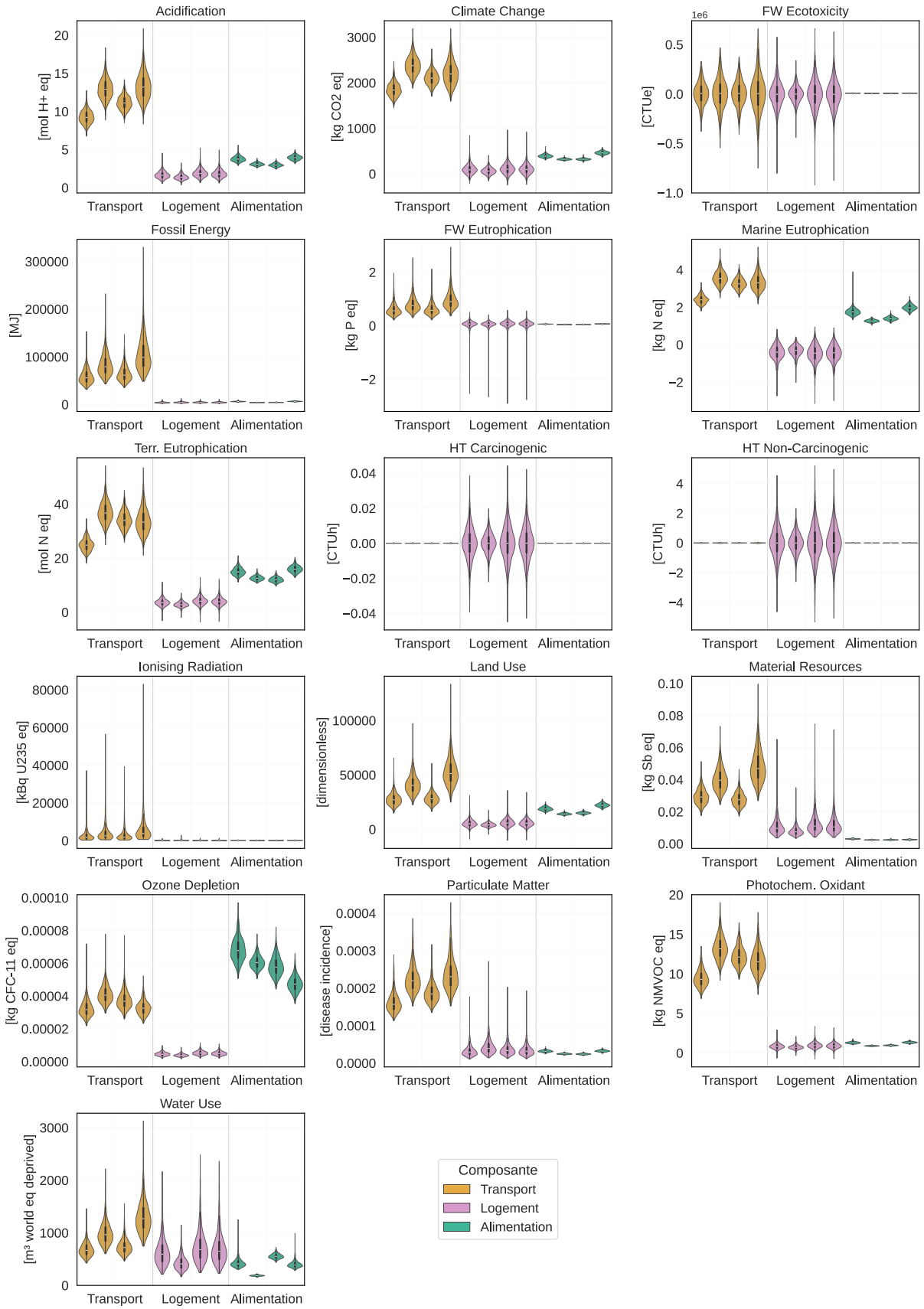


Figure 8. Distributions de Monte-Carlo, weekend par weekend, pour les trois composantes qui varient d'un weekend à l'autre. Figure établie sur les tirages de Monte-Carlo – voir **Section 6.2** pour la réserve émise concernant l'hébergement.

6.2 Contrôle de cohérence déterministe / Monte-Carlo

Une simulation Monte-Carlo n'est utilisable que si sa médiane reste proche de la valeur déterministe. Un écart modéré est normal et provient de l'asymétrie des distributions lognormales d'`ecoinvent`, dont la propagation décale la médiane vers le haut. Un écart important, ou l'apparition de tirages négatifs sur une grandeur physiquement positive, signale au contraire un problème de modélisation. Le **Tableau 7** rapporte ce contrôle pour le total et pour les trois composantes principales.

L'hébergement, en revanche, présente plusieurs anomalies. Pour le changement climatique, la médiane de Monte-Carlo de l'hébergement vaut 19 % de la valeur déterministe, avec 14 % de tirages négatifs ; pour l'eutrophisation marine, la médiane est même négative, avec 87 % de tirages négatifs. Une nuitée d'hébergement ne peut pas avoir une empreinte carbone négative. Après investigation des bases de données, l'explication semble se trouver dans la manière dont les flux de traitement de déchets – par convention d'`ecoinvent`, représentés par des entrées négatives – sont propagés *via* `brightway` lors de la simulation Monte-Carlo.

Par conséquent, les distributions Monte-Carlo de l'hébergement ne peuvent être utilisées pour le changement climatique, l'eutrophisation marine, l'eutrophisation d'eau douce et l'écotoxicité d'eau douce. C'est la raison pour laquelle l'analyse de contribution des sections précédentes a été menée sur la base des résultats déterministes.

Au niveau du total de la convention, l'anomalie reste largement compensée par le décalage inverse du transport : le rapport entre médiane et déterministe se tient entre 0,96 et 1,18 pour douze catégories sur seize. Les intervalles de confiance des totaux (**Tableau 5**) restent majoritairement utilisables pour les catégories de classe I et II, à l'exception de l'eutrophisation marine.

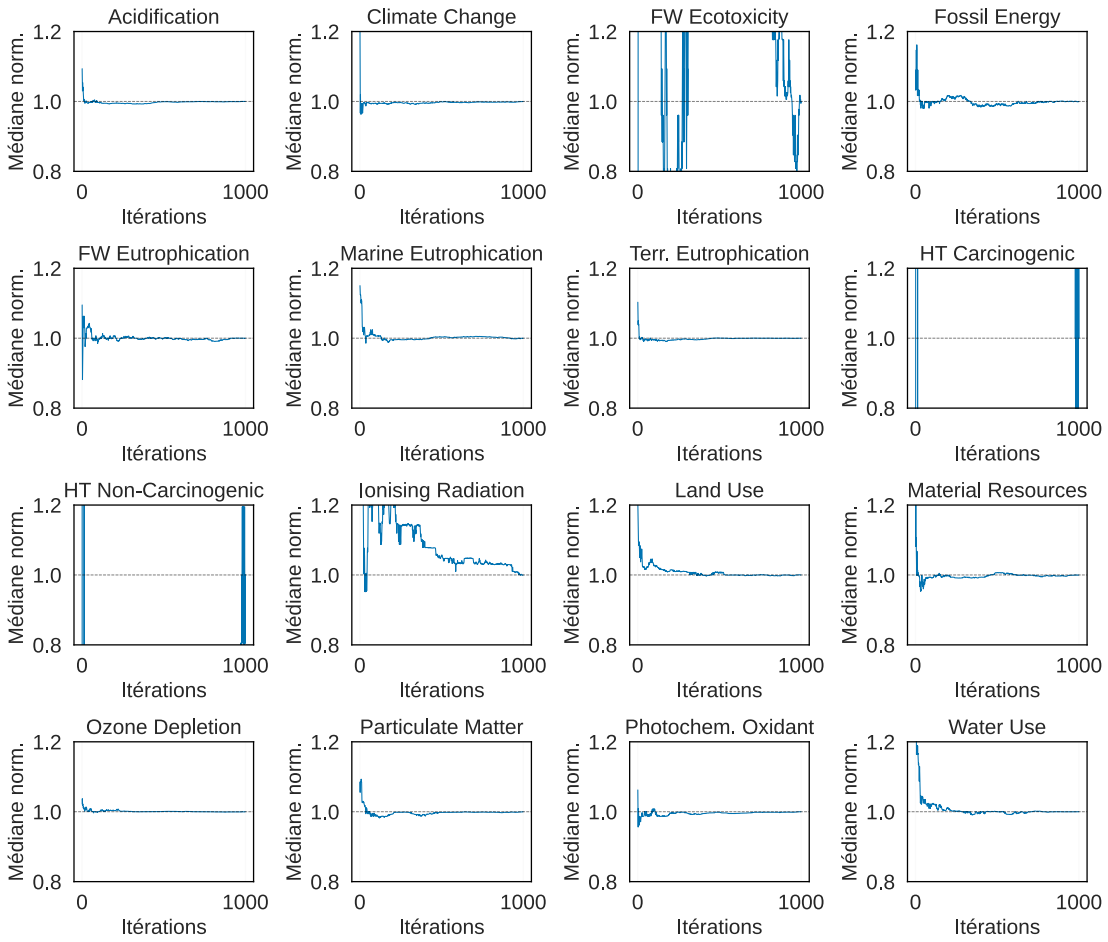


Figure 9. Médiane cumulée du total de la convention en fonction du nombre d'itérations Monte-Carlo, normalisée par la médiane finale, pour les seize catégories.

Catégorie	Rob.	MC / dét. total	MC / dét. transport	MC / dét. logement	MC / dét. alimentation	Tirages négatifs hébergement
Acidification	II	1,11	1,15	0,97	1,00	0 %
Climate Change	I	0,96	1,13	0,19	1,00	14 %
FW Ecotoxicity	III	0,86	0,53	−0,28	1,00	51 %
Fossil Energy	I	1,10	1,11	1,00	1,00	0 %
FW Eutrophication	III	1,17	1,37	0,47	1,00	17 %
Marine Eutrophication	II	0,71	1,15	−0,21	1,00	87 %
Terr. Eutrophication	II	1,07	1,14	0,76	1,00	1 %
HT Carcinogenic	III	9,55	0,97	95,13	1,00	50 %
HT Non-Carcinogenic	III	−46,68	−5,76	−548,70	0,98	50 %
Ionising Radiation	II	1,12	1,13	1,09	1,00	0 %
Land Use	II	1,10	1,14	1,06	1,00	2 %
Material Resources	III	1,16	1,11	1,20	1,00	0 %
Ozone Depletion	I	1,06	1,16	0,98	1,00	0 %
Particulate Matter	II	1,19	1,21	1,11	0,99	0 %
Photochem. Oxidant	II	1,11	1,17	0,71	1,00	1 %
Water Use	II	1,07	1,09	1,02	0,99	0 %

Tableau 7. Rapport entre la médiane de Monte-Carlo et la valeur déterministe, pour le total et pour les trois composantes qui portent l'essentiel de l'impact, et proportion de tirages négatifs sur l'hébergement. En orange, les écarts supérieurs à 35 % et les proportions de tirages négatifs supérieures à 5 %, seuil au-delà duquel la distribution est considérée comme suspecte.

6.3 Catégories non exploitables

Les trois catégories de toxicité appellent une réserve à deux niveaux, qu'il faut distinguer. Leurs distributions de Monte-Carlo ne sont pas interprétables : l'intervalle de confiance à 90 % traverse zéro sur plusieurs ordres de grandeur, la moitié environ des tirages sont négatifs, et le rapport entre médiane et déterministe atteint des valeurs sans signification. Leurs valeurs déterministes, en revanche, sont calculées normalement et restent positives ; ce qui les fragilise est d'un autre ordre, la classe de robustesse III que la méthode leur attribue, c'est-à-dire l'incertitude méthodologique des facteurs de caractérisation eux-mêmes, que cette étude ne quantifie pas.

Ce comportement ne vient pas des facteurs de caractérisation `USEtox`, dont l'incertitude propre n'a pas été utilisée dans la propagation des incertitudes : la simulation ne fait varier que l'inventaire. Les résultats de l'évaluation des impacts par Monte-Carlo émergent de la façon dont les flux de traitement de déchets sont propagés, phénomène similaire à ce qui a été constaté sur l'activité d'hébergement en **Section 6.2**. Ces flux sont portés par des montants négatifs et leur signe n'est pas conservé d'un tirage à l'autre, si bien qu'une charge devient un crédit.

Les catégories de toxicité y sont les plus exposées parce que leurs facteurs de caractérisation se concentrent précisément sur les émissions des activités de traitement de déchets : sur l'hébergement du premier weekend, les cinq premiers contributeurs à la toxicité humaine non cancérigène sont un traitement de résidus d'incinération, deux fonderies de cuivre et deux traitements de boues d'épuration. L'amplitude de la distribution en est affectée, et la médiane des tirages s'éloigne de la valeur déterministe de plusieurs ordres de grandeur, là où le changement climatique, moins dépendant de ces mêmes flux, ne s'en écarte que d'un facteur quatre. Autrement dit, la propagation d'incertitude est en cause pour les distributions, et la méthode d'évaluation pour les valeurs centrales. Ces catégories sont conservées dans les tableaux par souci de transparence, sans intervalle de confiance exploitable, et aucune conclusion, aucune comparaison et aucune recommandation du présent rapport ne s'appuie dessus.

6.4 Distinguabilité des composantes

Le test décrit en **Section 4.3** conclut à la distinguabilité pour treize catégories sur seize, comme le détaille la **Figure 10**. Autrement dit, dans treize catégories, au moins une composante se sépare nettement d'une autre malgré le recouvrement des distributions. Les trois catégories qui échouent au test sont, sans surprise, les trois catégories de toxicité.

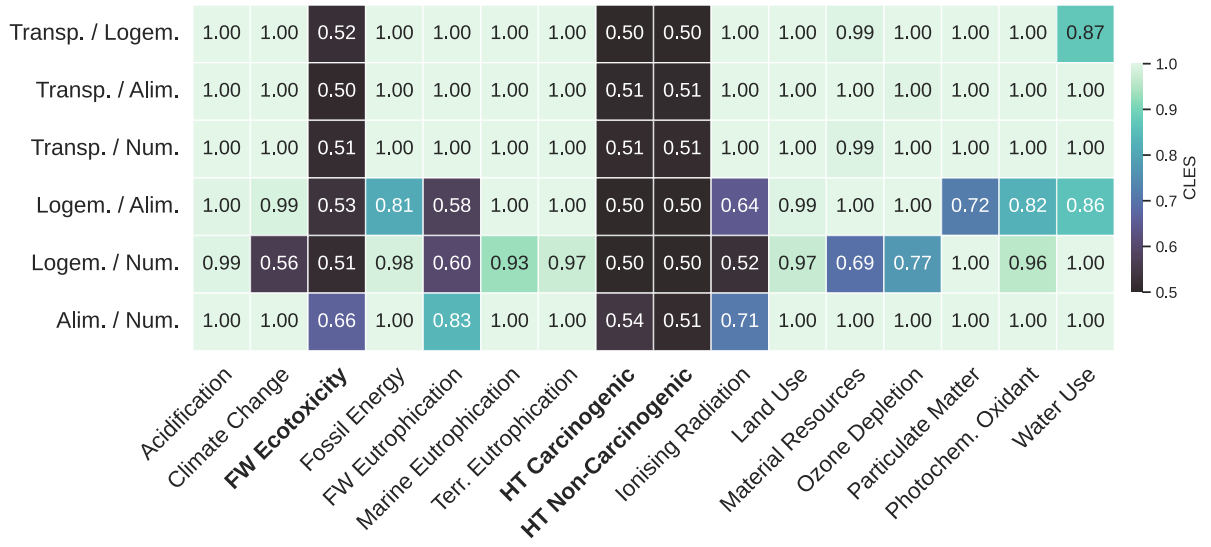


Figure 10. Résultats CLES pour chacune des six paires de composantes et les seize catégories d'impact. Une valeur de 0,5 signifie que les deux distributions sont indiscernables, une valeur de 1,0 qu'elles sont parfaitement séparées. Les colonnes en gras sont les catégories qui échouent au test.

6.5 Sensibilité au choix de scénario pour l'alimentation

L'inventaire alimentaire porte deux incertitudes irréductibles. La taille des portions servies, traitée en **Section 3.5**, entre dans la simulation par l'incertitude de masse de chaque produit. Le choix de la référence `Agribalyse` qui représente ce produit fait l'objet de la présente section. Il faut noter que la restauration a été entièrement végétarienne, voire végane : il ne s'agit donc pas de mettre en balance des régimes alimentaires.

Cependant, les factures ne décrivent pas la composition exacte d'un plat, et plusieurs références de la base sont ainsi souvent plausibles pour un même produit facturé. Plutôt que de trancher, nous avons fait le choix de conserver tous les candidats et avons construit deux bornes, en retenant systématiquement les candidats de plus faible puis de plus fort score `EF 3.1` agrégé. L'écart entre ces deux bornes mesure alors le poids du choix des références et constitue par ailleurs un test indirect de la pertinence de l'outil `AgribalyseAutoderive`.

Le **Tableau 8** donne cet écart par catégorie. Les catégories les plus sensibles sont celles où les références `Agribalyse` se distinguent le plus entre elles, c'est-à-dire celles qui dépendent des pratiques agricoles amont plutôt que de l'énergie de transformation. La catégorie concernant l'appauvrissement de la couche d'ozone montre un résultat opposé : la borne construite sur le plus faible score agrégé y est plus impactante de 3,8 %. Autrement dit, des produits mieux classés sur le score unique sont ici plus impactants sur la seule couche d'ozone. Les bornes s'appliquent à l'ensemble des repas des quatre weekends, et donc au total de la convention, non à un repas isolé.

Les candidats sont en effet départagés sur le score `EF 3.1` agrégé, qui pondère les seize catégories en une valeur unique. En soi, rien ne garantit qu'un candidat mieux classé sur cet agrégat le soit aussi sur chacune des catégories prises séparément. Les deux bornes encadrent donc l'agrégat, mais pas chaque catégorie individuellement. Cette limite est difficilement dépassable : regarder catégorie par catégorie impliquerait le plus souvent de ne pas pouvoir choisir parmi les candidats à moins de sélectionner arbitrairement une catégorie d'impact faisant office de critère.

Cela étant dit, ici l'écart ne dépasse jamais 7 %. Le choix des références `Agribalyse` introduit donc une incertitude réelle mais clairement bornée, ce qui ne remet en cause ni les ordres de grandeur ni la hiérarchie des contributions établie en **Section 5.2**.

Catégorie	Rob.	Gain	Catégorie	Rob.	Gain
Marine Eutrophication	II	6,9 %	Photochem. Oxidant	II	1,2 %
Land Use	II	5,5 %	FW Eutrophication	III	1,1 %
Terr. Eutrophication	II	5,3 %	Fossil Energy	I	0,8 %
Water Use	II	4,9 %	Ionising Radiation	II	0,8 %
FW Ecotoxicity	III	4,9 %	HT Carcinogenic	III	0,4 %
Acidification	II	3,7 %	Material Resources	III	0,1 %
Climate Change	I	2,4 %	HT Non-Carcinogenic	III	+0,1 %
Particulate Matter	II	1,8 %	Ozone Depletion	I	+3,8 %

Tableau 8. Écart entre les deux bornes issues du choix des références `Agribalyse 3.2`, par catégorie, classées par écart décroissant. Une valeur en orange signale une catégorie où la borne construite sur le plus faible score agrégé est en réalité la plus impactante.

La **Figure 11** met les deux bornes en regard, catégorie par catégorie. Elle rend effectivement visible le rapport entre les deux sources d'incertitude : sur presque toutes les catégories, la largeur des distributions dépasse très largement le décalage entre les deux bornes. Il en découle que l'incertitude amenée par les quantités et la qualité des données `Agribalyse` – ainsi que les données `ecoinvent` sous-jacentes – domine l'incertitude issue du choix des proxies `Agribalyse`.

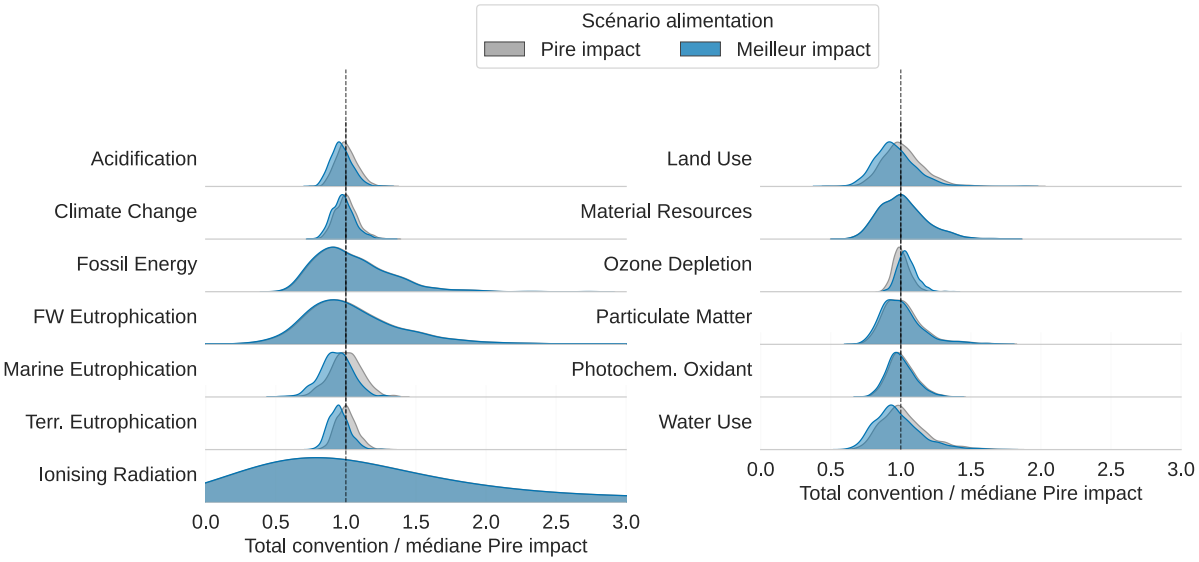


Figure 11. Distributions de Monte-Carlo du total de la convention pour le Meilleur et Pire scénario alimentation, normalisées à la médiane de la borne haute. Le décalage entre les deux courbes d'une même catégorie d'impact est l'effet du choix des proxies `Agribalyse`, la largeur des courbes est l'incertitude issue de l'inventaire.

6.6 Scénarios de transport

Le transport porte 68 % de l'impact changement climatique de la convention. Sa valeur dépend principalement de deux choix d'organisation : le lieu de chaque weekend, et les exceptions au train accordées à certaines personnes. Nous avons construit trois scénarios évaluant l'effet de ces paramètres. Chaque scénario garde les participant·es réel·les de chaque weekend et ne modifie que leurs trajets :

1. Regroupé : les quatre weekends se tiennent à Fontainebleau, lieu du premier évènement en présentiel. Un trajet en train vers un autre lieu d'accueil devient le trajet réel jusqu'à Paris, suivi du trajet de Paris Gare de Lyon à Fontainebleau-Avon, comme au premier weekend. Un trajet en voiture devient un trajet en voiture jusqu'à Fontainebleau. Si une personne est venue en voiture de la même commune au premier weekend, nous reprenons sa distance ; sinon, nous utilisons un relevé routier. Exception (8 personnes, toutes au WE2) : trois

personnes n'ont pris la voiture qu'au WE2 et le train à tous leurs autres weekends. Cinq autres, présentes au seul WE2, habitaient à moins de 70 km du lieu par la route. Toutes sont considérées comme rejoignant Fontainebleau en train.
2. Tout-train : les lieux réels sont conservés et aucun trajet en voiture évitable n'est fait. La personne rejoint en voiture la gare la plus proche, puis suit l'itinéraire ferroviaire jusqu'au lieu d'accueil. Seuls restent en voiture les trajets partis à moins de 30 km du lieu d'accueil, trop courts pour passer par une gare.
3. Scénario combiné : les deux scénarios précédents réunis.

Les distances des nouveaux tronçons suivent les règles de la **Section 3.2.1** : 13 liaisons ferroviaires calculées avec `RailTrace` et 8 relevés routiers sur `Google Maps`. Les navettes routières affrétées aux deuxième et troisième weekends disparaissent des scénarios regroupés. La voiture reste comptée en véhicules-kilomètres, avec le taux de covoiturage observé. L'incertitude est propagée par Monte-Carlo sur 1 000 tirages communs à la situation réelle et aux trois scénarios, si bien que chaque tirage donne une réduction cohérente. Les kilométrages y sont tenus fixes : seule l'incertitude des jeux de données `ecoinvent` de transport varie.

La **Figure 12** donne la réduction obtenue dans chaque scénario, rapportée au total de la convention – valeur déterministe – et le **Tableau 11**, en annexe, ses valeurs détaillées. Sur le changement climatique, regrouper les weekends aurait réduit le total de 18 %, supprimer la voiture évitable de 23 %, et combiner les deux de 34 % : soit 3 792 kg CO_2 eq sur les 7 574 du transport des quatre weekends. Les gains ne s'additionnent pas. En effet, regrouper les weekends raccourcit déjà les trajets en voiture que le scénario tout-train supprime. La valeur déterministe se situe en bas de l'intervalle de confiance, parfois juste en dessous : l'asymétrie lognormale des distributions d'`ecoinvent` décale les tirages vers le haut – cf. **Section 6.2**.

Le report vers le train aurait eu un léger revers. Le TGV porte l'essentiel de la consommation d'eau et des rayonnements ionisants du transport, par la production d'électricité nucléaire – cf. **Section 5.4**. Le scénario tout-train ne réduit ainsi la consommation d'eau que de 0,8 % et augmente les rayonnements ionisants de 6,9 %. Regrouper les weekends, qui raccourcit aussi les trajets en train, aurait en revanche réduit les impacts dans toutes les catégories exploitables.

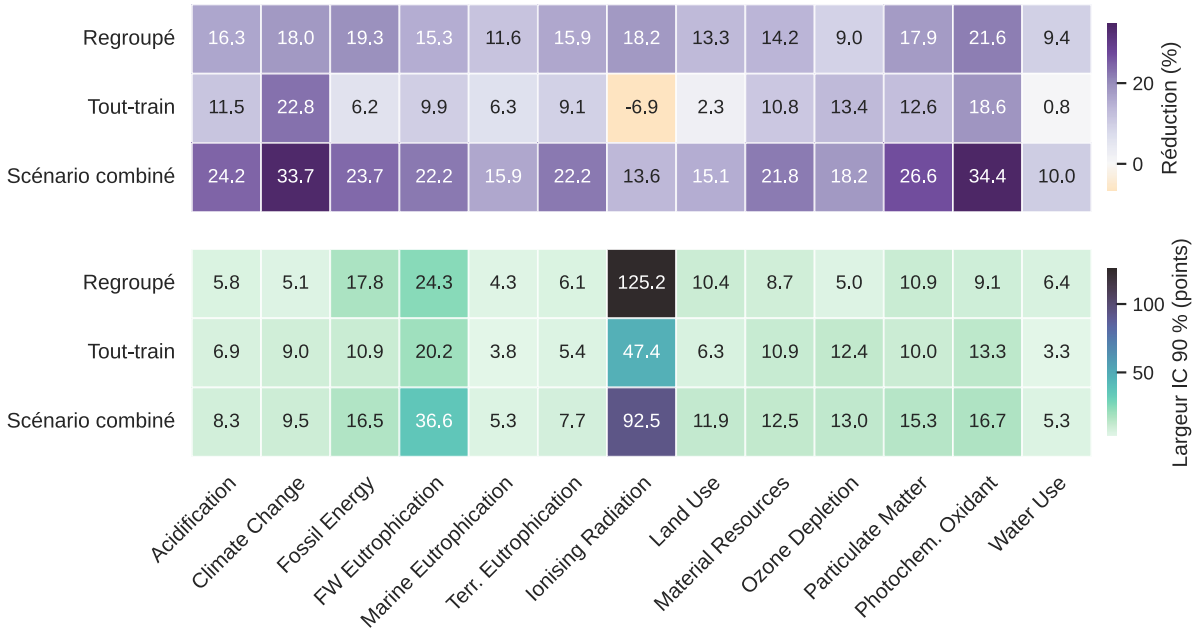


Figure 12. En haut, réduction de l'impact total de la convention dans chaque scénario de transport, en pourcentage du total déterministe, pour les treize catégories distinguables ; en orange, une hausse. En bas, la largeur de l'intervalle de confiance à 90 % de cette réduction, en points. Valeurs détaillées au **Tableau 11**.

Ces scénarios quantifient ainsi le coût environnemental de contraintes que l'organisation a assumées. Les quatre lieux répartissaient les temps de transport entre participant·es venu·es de toute la France, et les exceptions au train répondaient à des situations individuelles, notamment de santé.

7 Interprétation

7.1 Points chauds

- Le déplacement des participant·es pour les weekends en présentiel domine, représentant 68 % du carbone et constituant le premier poste dans quinze catégories sur seize. Ce n'est pas un résultat surprenant pour un événement présentiel, mais son ampleur est à souligner : le transport pèse plus que tout le reste réuni sur la plupart des catégories, malgré la stratégie du comité de pilotage visant à maximiser l'usage du train.
- Le nombre de weekends en présentiel, étant donné l'envergure nationale du dispositif, est un facteur important qui découle du premier point. Chaque weekend coûte entre 22 et 26 % du total, tandis qu'une séquence en ligne coûte environ 0,05 % du total. C'est le seul paramètre de conception dont la modification produirait un effet au premier ordre.
- La restauration pèse sur les catégories autres que le changement climatique. Les régimes végétariens voire végans ont en effet un faible impact dans cette catégorie. Cela étant, il s'agit de la première contribution sur l'appauvrissement de la couche d'ozone et la deuxième sur l'occupation des sols et l'eutrophisation terrestre.

7.2 Contrôles de complétude, de cohérence et de sensibilité

- Après de nombreuses vérifications manuelles de la complétude des inventaires, ces derniers sont traités algorithmiquement pour l'étape de calcul des impacts puis traitement des résultats dans un `Jupyter notebook`, ce qui garantit l'absence d'oublis. Les activités agrégées du système construit ont été écartées des sommes, ce qui garantit l'absence de double comptage. Une seule lacune subsiste : l'activité `InterWE, fonctionnement` n'est pas incluse dans l'agrégat racine de l'inventaire source, alors qu'elle l'est dans les totaux de ce rapport, issus des sommes des activités élémentaires. L'écart correspondant vaut 50,6 kg CO_2 eq, soit 0,45 % du total.
- Le contrôle de cohérence porte sur l'homogénéité des sources. Comme exposé en **Section 3.1**, l'alimentation passe par `Agribalyse` et le reste par `ecoinvent`, mais `Agribalyse` repose sur `ecoinvent`. Les deux parties du système (Alimentation et le reste) partagent donc le même système d'arrière-plan au global. Reste une incohérence résiduelle : l'étude utilise `Agribalyse 3.2` qui repose sur `ecoinvent 3.9.1` tandis que le reste du système repose sur une version plus récente : `ecoinvent 3.11`. Enfin, une réserve peut être émise sur les conséquences d'avoir deux parties de système séparées. En effet, il en résulte que le raccordement se fait au niveau des scores caractérisés et non des flux élémentaires, ce qui empêche toute analyse de contribution comparée au niveau des processus d'arrière-plan.
- L'analyse de sensibilité, enfin, a été réalisée quasiment exhaustivement en combinant la propagation d'incertitude par Monte-Carlo présentée en **Section 6.2** et les analyses de scénarios sur l'alimentation de la **Section 6.5** et sur le transport de la **Section 6.6**. Un approfondissement utilisant l'analyse de sensibilité globale a été évalué comme non nécessaire au vu des résultats clairs issus de la **Section 5.2** à la **Section 5.5**.

7.3 Limites

- Le raccordement entre `Agribalyse` et `ecoinvent` constitue actuellement la principale limite, décrite en **Section 3.1**. Elle affecte la finesse des comparaisons entre l'alimentation et les autres composantes, sans remettre en cause leur ordre de grandeur.
- La propagation d'incertitude sur l'hébergement, documentée en **Section 6.2**, interdit d'utiliser les distributions par composante sur quatre catégories. Les valeurs déterministes, elles, restent utilisables, et c'est sur elles que repose l'analyse de contribution.
- Trois catégories sur seize, toutes de robustesse classée III *a priori* de l'étude, sont inexploitables lors de la propagation des incertitudes, ce qui restreint la couverture complète de l'étude à treize catégories.

- Cette étude n'a enfin pas fait l'objet d'une revue critique externe au sens de l'ISO 14044, ce qui exclut normalement son usage pour une affirmation comparative publique.

8 Recommandations

Les recommandations sont classées par ordre de gain attendu décroissant :

- Le rapport entre le coût carbone d'un weekend en présentiel et celui d'une séquence de travail en ligne est d'environ 162. Remplacer un weekend sur quatre par une séquence en ligne réduirait l'empreinte carbone d'environ 22 à 26 %, soit un ordre de grandeur au-dessus de tout autre levier identifié. Vu l'importance de la présence physique pour la bonne tenue d'une démarche délibérative – en particulier au regard de l'importance sociale des moments informels – une telle substitution n'est en pratique pas envisageable.
- Réduire encore plus le recours à la voiture individuelle est une piste évidente car elle concerne peu de personnes tout en portant 28 % de l'empreinte carbone totale. Un covoiturage systématique voire aucun trajet réalisé en voiture individuelle agirait directement et proportionnellement sur ce poste sans rien changer au format. Le scénario tout-train en donne la borne haute : 23 % du changement climatique total, rabattement en voiture jusqu'à la gare compris – cf. **Section 6.6**.
- Le choix des lieux d'accueil gagnerait à intégrer un critère de sobriété en eau. L'hébergement pèse 30 % de la consommation d'eau contre 16 % du changement climatique. Cependant, cet élément est lié au fait qu'`ecoinvent 3.11` ne documente l'exploitation d'un hébergement que pour le Brésil et le Pérou. Nous avons régionalisé ces inventaires pour la France comme décrit en **Section 3.3**, mais les flux d'inventaire eux-mêmes – consommation d'eau et de linge en particulier – restent ceux du modèle d'origine. Un inventaire représentatif de divers types de l'hôtellerie française semble nécessaire pour améliorer cette partie de l'étude et les conclusions à en tirer.
- La restauration a été végétarienne sur tous les weekends, ce qui place déjà l'alimentation dans le bas de la fourchette accessible à un événement de ce format. Les leviers restants consistent donc dans le choix des produits et dans leur provenance, sur les catégories où l'alimentation pèse le plus, l'appauvrissement de la couche d'ozone, l'occupation des sols et l'eutrophisation terrestre, où elle porte de 29 à 61 % du total. Cependant, ces éléments ne sont pas nécessairement quantifiés dans `Agribalyse 3.2`, les résultats de ces améliorations ne seraient alors pas visibles dans les résultats. Sur le changement climatique, où l'alimentation ne pèse que 13 %, il n'y a pas de gain important à attendre.

9 Conclusion

L'empreinte carbone de la Convention IESF Connaissances s'établit à 11 237 kg CO_2 eq pour un cycle complet de quatre weekends, soit environ 225 kg CO_2 eq par participant·e, l'équivalent d'un Paris-Marseille parcouru seul en voiture. Sa consommation d'eau s'établit à 7 688 m^3 équivalents mondiaux privés, soit 154 m^3 par participant·e, l'ordre de grandeur, à titre indicatif seulement, de trois années de consommation domestique d'eau potable d'un habitant en France, la comparaison restant limitée car l'indicateur AWARE utilisé pour l'étude pondère les volumes par la tension sur la ressource. Cette eau est par ailleurs essentiellement consommée en amont, dans les chaînes de production, et non sur les lieux de la convention. Ces résultats sont modestes au regard de ce que représente un processus délibératif de cette ampleur, mais ils sont d'abord déterminés par le nombre de rassemblements physiques, puis par leur localisation et par les modes de transport utilisés. Les scénarios de la **Section 6.6** chiffrent ces deux derniers leviers : réunir les weekends en un seul lieu et supprimer les trajets en voiture évitables réduirait l'empreinte carbone de 34 %. Ils se heurtent cependant aux nécessités réelles de l'organisation : un partage juste des temps de transport entre participant·es venu·es de toute la France, et des personnes pour qui l'option du train n'était pas raisonnablement possible.

Le carbone et l'eau ne viennent d'ailleurs pas des mêmes postes. Le transport porte 68 % du changement climatique et 44 % de la consommation d'eau, mais pour des raisons opposées : la voiture pour le premier, le

TGV et l'eau évaporée par le parc électrique pour la seconde. L'hébergement, qui ne pèse que 16 % du carbone, en porte 30 % de l'eau.

Notre étude nous a permis d'établir trois éléments importants concernant les impacts environnementaux d'un processus délibératif de type convention citoyenne. D'abord, que le transport domine les impacts dans une proportion qui laisse peu de place aux autres leviers. Ensuite, comme souvent en ACV, que le raisonnement sur le seul critère du changement climatique est trompeur : l'alimentation et l'hébergement changent complètement de rang selon la catégorie considérée, et une décision prise uniquement sur l'impact carbone déplacerait l'impact sans nécessairement le réduire. Enfin, que la robustesse des résultats est inégale : treize catégories sur seize sont exploitables de bout en bout.

10 Annexe : résultats complets

Catégorie	Rob.	Pire impact		Meilleur impact		Gain	Disp.
		Détermin.	Médiane MC	Détermin.	Médiane MC		
Acidification	II	63,31	70,01	60,69	67,39	3,7 %	0,25
Climate Change	I	11 237	10 800	10 973	10 540	2,4 %	0,26
FW Ecotoxicity	III	92 103	79 630	88 608	75 719	4,9 %	44,1
Fossil Energy	I	314 190	345 380	311 394	342 539	0,8 %	0,82
FW Eutrophication	III	3,084	3,602	3,044	3,561	1,1 %	1,21
Marine Eutrophication	II	25,22	17,93	23,98	16,69	6,9 %	0,38
Terr. Eutrophication	II	191,9	205,7	180,8	194,8	5,3 %	0,24
HT Carcinogenic	III	$6{,}14{\cdot}10^{-6}$	$5{,}87{\cdot}10^{-5}$	$5{,}93{\cdot}10^{-6}$	$5{,}84{\cdot}10^{-5}$	0,4 %	1 900,2
HT Non-Carcinogenic	III	$2{,}15{\cdot}10^{-4}$	−0,01003	$2{,}09{\cdot}10^{-4}$	−0,01004	−0,1 %	−1 324,0
Ionising Radiation	II	9 809	11 014	9 737	10 926	0,8 %	5,48
Land Use	II	222 586	243 779	208 577	230 293	5,5 %	0,46
Material Resources	III	0,2193	0,2554	0,2192	0,2551	0,1 %	0,56
Ozone Depletion	I	$3{,}87{\cdot}10^{-4}$	$4{,}11{\cdot}10^{-4}$	$4{,}03{\cdot}10^{-4}$	$4{,}26{\cdot}10^{-4}$	−3,8 %	0,19
Particulate Matter	II	$9{,}17{\cdot}10^{-4}$	0,001087	$8{,}98{\cdot}10^{-4}$	0,001068	1,8 %	0,50
Photochem. Oxidant	II	49,99	55,74	49,32	55,06	1,2 %	0,33
Water Use	II	7 688	8 238	7 313	7 831	4,9 %	0,53

Tableau 9. Résultats complets pour les deux scénarios alimentaires. « Gain » est la réduction obtenue en passant de Pire à Meilleur impact. « Disp. » est la largeur de l'IC 90 % rapportée à la médiane. En orange, les catégories dont l'intervalle de confiance à 90 % traverse zéro, critère de non-exploitabilité utilisé en **Section 6.3**. Une dispersion élevée sur un intervalle entièrement positif signale une distribution large mais pas nécessairement inexploitable – ex : rayonnements ionisants.

Catégorie	Transport	Logement	Alimentation	Numérique
Acidification	64,5 %	10,9 %	21,8 %	2,9 %
Climate Change	68,2 %	16,4 %	13,3 %	2,1 %
FW Ecotoxicity	41,6 %	26,8 %	27,4 %	4,2 %
Fossil Energy	86,4 %	5,2 %	6,5 %	1,9 %
FW Eutrophication	67,2 %	18,3 %	7,2 %	7,3 %
Marine Eutrophication	43,7 %	29,5 %	25,4 %	1,3 %
Terr. Eutrophication	59,5 %	9,8 %	29,1 %	1,7 %
HT Carcinogenic	62,7 %	15,5 %	19,0 %	2,8 %
HT Non-Carcinogenic	60,2 %	12,8 %	20,6 %	6,5 %
Ionising Radiation	90,7 %	2,7 %	4,3 %	2,3 %
Land Use	59,0 %	8,6 %	31,5 %	0,9 %
Material Resources	60,2 %	14,6 %	4,7 %	20,5 %
Ozone Depletion	31,9 %	4,8 %	60,5 %	2,7 %
Particulate Matter	72,4 %	13,4 %	12,3 %	1,8 %
Photochem. Oxidant	79,6 %	9,6 %	9,0 %	1,9 %
Water Use	44,0 %	29,6 %	20,4 %	6,0 %

Tableau 10. Parts déterministes des quatre composantes agrégées. Scénario Pire impact pour l'alimentation.

Catégorie	Rob.	Regroupé		Tout-train		Scénario combiné	
		Réd.	IC 90 %	Réd.	IC 90 %	Réd.	IC 90 %
Acidification	II	16,3 %	16,3 à 22,1	11,5 %	10,5 à 17,4	24,2 %	24,4 à 32,7
Climate Change	I	18,0 %	17,8 à 22,9	22,8 %	20,9 à 29,9	33,7 %	33,1 à 42,6
FW Ecotoxicity	III	10,2 %	–	11,5 %	–	18,2 %	–
Fossil Energy	I	19,3 %	15,1 à 32,9	6,2 %	2,1 à 13,0	23,7 %	20,4 à 36,8
FW Eutrophication	III	15,3 %	13,5 à 37,8	9,9 %	7,9 à 28,1	22,2 %	19,9 à 56,5
Marine Eutrophication	II	11,6 %	11,2 à 15,6	6,3 %	5,4 à 9,2	15,9 %	15,7 à 21,1
Terr. Eutrophication	II	15,9 %	15,4 à 21,5	9,1 %	7,9 à 13,4	22,2 %	21,9 à 29,6
HT Carcinogenic	III	16,4 %	–	16,7 %	–	28,1 %	–
HT Non-Carcinogenic	III	14,1 %	–	9,3 %	–	20,6 %	–
Ionising Radiation	II	18,2 %	6,2 à 131,5	−6,9 %	−49,6 à −2,2	13,6 %	4,8 à 97,3
Land Use	II	13,3 %	11,2 à 21,6	2,3 %	0,5 à 6,8	15,1 %	13,1 à 25,0
Material Resources	III	14,2 %	12,3 à 21,0	10,8 %	8,2 à 19,1	21,8 %	19,7 à 32,2
Ozone Depletion	I	9,0 %	8,4 à 13,5	13,4 %	11,1 à 23,5	18,2 %	16,5 à 29,5
Particulate Matter	II	17,9 %	17,6 à 28,5	12,6 %	11,3 à 21,4	26,6 %	26,6 à 42,0
Photochem. Oxidant	II	21,6 %	21,6 à 30,7	18,6 %	16,4 à 29,8	34,4 %	33,7 à 50,4
Water Use	II	9,4 %	8,0 à 14,5	0,8 %	−0,4 à 2,9	10,0 %	9,4 à 14,7

Tableau 11. Réduction de l'impact total de la convention dans chaque scénario de transport, en pourcentage du total déterministe. En orange, une augmentation. Les catégories de toxicité sont données sans intervalle de confiance – cf. **Section 6.3**.

11 Annexe : reproductibilité

Les valeurs et figures présentes dans ce rapport ont été produites *via* divers outils écrits en `python`. Un dossier compagnon du rapport contenant ces outils est mis à disposition : les figures et les résultats peuvent être régénérés de façon autonome, il ne contient que des données anonymisées, et il est possible de charger un fichier d'environnement `environment.yml` pour créer un environnement `python` fonctionnel minimal.

Dossier	Contenu
`analysis/`	Les cinq notebooks et leur notice, le fond de carte et l'exemple d'inventaire de trajets
`analysis/figures/`	Les figures du rapport au format `svg`
`data/inventory/brightway/`	Inventaires sous format classeur `csv` / `xlsx` et paquet `brightway`
`data/inventory/transport/`	Inventaire de transport agrégé par weekend et par mode, navettes, distribution d'incertitude ferroviaire
`data/inventory/food/`	Inventaire des factures, sa normalisation et le choix des références `Agribalyse 3.2`
`data/lcia-results/`	Scores déterministes par activité et par catégorie
`data/monte-carlo/`	Simulations Monte-Carlo, un fichier par catégorie d'impact
`data/rooms/`	Estimation justifiant l'exclusion des salles de cours de l'étude
`data/scenarios/`	Inventaire des scénarios par weekend et mode, impacts et réductions par scénario

Tableau 12. Organisation du dossier compagnon du rapport.

Cinq notebooks produisent l'ensemble des figures et documentent les choix qui les sous-tendent. Ils sont indépendants les uns des autres et s'exécutent dans n'importe quel ordre.

1. `IESF-Convention-LCA_impact-analysis.ipynb` charge les scores d'impact déterministes et les tirages Monte-Carlo, reconstruit l'arbre de processus, exécute les analyses d'incertitude, génère les figures de résultats et produit la figure et le tableau des scénarios de transport – cf. **Section 6.6**.
2. `IESF-Convention-LCA_system-diagram.ipynb` génère la figure représentant l'arbre du système.
3. `IESF-Convention-LCA_rail-uncertainty.ipynb` ajuste et trace la bande d'incertitude sur les distances ferroviaires – cf. **Section 3.2.1**.
4. `IESF-Convention-LCA_flow-maps.ipynb` génère les cartes de flux de transport.
5. `IESF-Convention-LCA_rooms.ipynb` produit l'estimation des salles de cours – cf. **Section 2.4**.

Deux éléments ne sont pas diffusés :

- L'inventaire de transport n'est fourni qu'agrégé par weekend et par mode. Le détail trajet par trajet reste confidentiel pour minimiser les données personnelles associables aux participant·es. La forme agrégée suffit à tous les calculs d'impact, mais pas au tracé des cartes : le notebook de cartographie est donc accompagné d'un fichier d'exemple qui reproduit la structure attendue avec des trajets fictifs. Les cartes produites avec cet exemple ne seront donc pas celles présentes dans ce rapport. Les kilométrages des scénarios de transport, construits trajet par trajet, sont de même fournis agrégés par scénario, weekend et mode.
- La base de données adaptée `adapt-ecoinv-3.11-cutoff` contenant la régionalisation décrite en **Section 3.3** n'est pas diffusable : elle reprend des jeux de données `ecoinvent` complets, que la licence de cette base de données ne permet pas de redistribuer. Elle se reconstruit cependant en quelques minutes en copiant les jeux d'exploitation d'hébergement brésiliens puis en réorientant leurs marchés d'arrière-plan vers le marché approprié. Refaire les calculs d'impact depuis `brightway` suppose alors, dans cet ordre : partir d'un projet `brightway 2.5` contenant déjà `ecoinvent 3.11 cutoff` et sa `biosphere`, reconstruire la base adaptée, puis seulement ensuite importer `IESF-Convention2025`, qui référence les nuitées de la première. Importer `IESF-Convention2025` en premier échouera à cause des liens entre bases de données non résolus.

L'alimentation ne passe pas par `brightway` : elle est calculée sur `Agribalyse 3.2` par `AgribalyseAutoderive`, tous les deux disponibles séparément sous licence libre – cf. **Section 12**.

12 Références

Standards, méthodologies, bases de données

- ISO 14040:2006, *Management environnemental. Analyse du cycle de vie. Principes et cadre* : https://www.iso.org/standard/37456.html.
- ISO 14044:2006/Amd 2:2020, *Management environnemental. Analyse du cycle de vie. Exigences et lignes directrices* : https://www.iso.org/standard/38498.html et https://www.iso.org/standard/76122.html.
- Commission européenne, Centre commun de recherche, *Environmental Footprint (EF) reference package 3.1*, 2022. Méthode d'évaluation des impacts et classes de robustesse des catégories : https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.html.
- Rosenbaum, R. K. et al., « USEtox, the UNEP-SETAC toxicity model », *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(7), 2008, p. 532-546. Modèle sous-jacent aux catégories de toxicité de classe III discutées en **Section 6.3** : https://doi.org/10.1007/s11367-008-0038-4.
- McGraw, K. O. et Wong, S. P., « A common language effect size statistic », *Psychological Bulletin*, 111(2), 1992, p. 361-365. Statistique utilisée pour le test de distinguabilité décrit en **Section 4.3** : https://doi.org/10.1037/0033-2909.111.2.361.
- Wernet, G. et al., « The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology », *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 2016, p. 1218-1230. Base utilisée en version 3.11, modèle système cutoff : https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8.
- ADEME, *Agribalyse 3.2. Base de données d'inventaires de cycle de vie des produits agricoles et alimentaires*. Source des facteurs utilisés pour la restauration : https://doc.agribalyse.fr/documentation.

Grammages de portion utilisés pour convertir les lignes de facture en masses

- GEMRCN, *Recommandation nutrition*, version 2.0, juillet 2015. Groupe d'étude des marchés en restauration collective et nutrition, ministère de l'économie. https://cantines.nice.fr/files/reco-nutrition-gemrcn-v2.0-juillet-2015.pdf.

Repère utilisé pour situer l'ordre de grandeur de la consommation d'eau de la convention

- Observatoire national des services d'eau et d'assainissement (SISPEA), *Consommation moyenne d'eau domestique par habitant*, 2023 : 53 m³ par habitant et par an. https://www.services.eaufrance.fr/chiffres/2.

Sources pour la discussion du modèle des nuitées d'hôtel

- ADEME, *Bilan des émissions de gaz à effet de serre du secteur du tourisme en France en 2022*, 2024. https://librairie.ademe.fr/changement-climatique/7637-bilan-des-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-du-secteur-du-tourisme-en-france-en-2022.html.
- Campos, C. et al., « Assessing the environmental impacts of three different types of accommodations in Portugal and Spain by using an LCA approach », *Science of the Total Environment*, 927, 2024, 172230 : https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172230.
- Échanges avec l'équipe du calculateur `Impact CO2` de l'ADEME, février 2026, sur la comparabilité de cette valeur avec un inventaire de cycle de vie. Communication personnelle.

Logiciels

- Mutel, C., « Brightway: an open source framework for life cycle assessment », *Journal of Open Source Software*, 2(12), 2017, p. 236. Cadre logiciel utilisé pour l'ACV : https://doi.org/10.21105/joss.00236.
- Steubing, B., de Koning, D., Haas, A. et Mutel, C., « The Activity Browser – An open source LCA software building on top of the brightway framework », *Software Impacts*, 3, 2020, 100012. Interface graphique de `brightway` : https://doi.org/10.1016/j.simpa.2019.100012.
- Clément, S., *RailTrace*, 2025. Reconstruction des distances ferroviaires à partir des billets, développé pour cette étude, licence libre : https://github.com/Oyoerf/IESF-Convention-KnowledgeSociety-TrainTripsDistances.
- Robineau, P., *AgribalyseAutoderive*, 2025. Impacts d'un inventaire alimentaire sur `Agribalyse 3.2`, encadrés par deux bornes, développé pour cette étude, licence libre : https://github.com/Paul-Robineau/AgribalyseAutoderive.
- Anthropic, *Claude Code*. Agent de programmation employé pour le code `python` et `typst` de ce rapport, cf. note liminaire : https://claude.com/product/claude-code.