



**London Bridge
À Bissen**

Flux d'air frais

Thomas LÖFFLER
Julien L'HOEST

Mai 2025

Réf. : 28 043n -1



TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION ET METHODOLOGIE.....	4
1. Contexte de l'étude	4
2. Présentation du site étudié (village de Bissen).....	4
3. Présentation du projet (implantation du Data Center).....	6
4. Principes généraux de la simulation CFD.....	7
5. Présentation des modèles utilisés.....	8
6. Paramètres de maillage.....	9
7. Conditions aux limites.....	10
7.1. Conditions Data Center	10
7.2. Conditions environnementales.....	12
7.3. Analyse de résultat de l'étude climatique luxembourgeoise.....	13
7.4. Définition des conditions limites	14
7.5. Conditions limites générales	15
7.6. Limite de comparaison.....	15
RESULTATS DE LA SIMULATION – SCENARIO SANS DATA CENTER.....	16
1. Température de l'air (coupe horizontale).....	16
2. Circulation de l'air (vecteurs de vent)	17
2.1. Résultats CFD.....	17
2.2. Comparaison avec l'étude nationale	17
3. Corridors d'air frais identifiés.....	19
RESULTATS DE LA SIMULATION – SCENARIO AVEC DATA CENTER	20
1. Température de l'air et gradients thermiques.....	20
2. Vecteur de flux d'air.....	22
ANALYSE COMPARATIVE ET INTERPRETATION	23
1. Circulation de l'air (évolution des vecteurs de vent)	23
2. Température de l'air et gradients thermiques.....	24
2.1. Interaction Parcelle projet / Village.....	24
2.2. Interaction Parcelle projet / Zone d'activité économique.....	25
3. Évolution des corridors d'air frais.....	26
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	27



1. Résumé des impacts mesurés.....	27
2. Compatibilité du projet avec le climat local	28
3. Validité du modèle par rapport aux données réelles et limite de l'étude	28
4. Variantes architecturales et techniques : un impact limité	29
5. Mesures d'atténuation passive	29
5.1. Réduction de l'imperméabilisation	29
5.2. Maintien des zones végétalisées.....	30
5.3. Optimisation de l'albédo des surfaces.....	30
6. Suggestions pour le développement du projet.....	30

INTRODUCTION ET METHODOLOGIE

1. Contexte de l'étude

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la procédure d'Évaluation des Incidences sur l'Environnement (EIE), telle que définie par la législation luxembourgeoise, notamment par la loi modifiée du 15 mai 2018 relative à l'évaluation des incidences sur l'environnement. Elle a pour objectif d'analyser de manière prévisionnelle les effets potentiels de l'implantation du Data Center sur le microclimat local, notamment en termes de circulation de l'air, d'atténuation des effets d'îlot de chaleur, d'évolution des températures et d'interactions avec l'environnement bâti et naturel avoisinant.

L'analyse constitue un outil essentiel pour anticiper les impacts environnementaux d'un projet avant sa réalisation. Elle permet de mettre en évidence d'éventuelles perturbations et de proposer, le cas échéant, des mesures d'atténuation ou d'adaptation. À travers des simulations CFD (Computational Fluid Dynamics), cette étude vise ainsi à fournir une base scientifique solide à la prise de décision, en s'assurant que le développement prévu s'insère harmonieusement dans son contexte environnemental.

2. Présentation du site étudié (village de Bissen)



Figure 1 : repérage parcelle

Le village de Bissen est situé dans le centre du Grand-Duché de Luxembourg, au sein du canton de Mersch. Il se caractérise par un tissu urbain de taille modeste, à dominante résidentielle, entouré d'un environnement naturel composé de zones agricoles, de plaines et de forêts. Cette configuration offre à la commune un cadre de vie relativement calme, avec une bonne qualité de l'air et une faible densité de construction hors zone industrielle.

Le site d'implantation du projet de Data Center se trouve en lisière nord-est du village, au sein d'une vaste plaine à faible déclivité, ponctuée par la présence de zones forestières. Actuellement non urbanisée, cette zone présente une couverture majoritairement végétale, avec des sols encore naturels ou semi-naturels. Cette configuration contribue localement à la régulation des flux d'air frais, en lien avec la dynamique thermique des plaines et des zones boisées environnantes.

Le site se situe à proximité des infrastructures existantes et en dehors du périmètre résidentiel, ce qui

permet d'envisager des raccordements techniques fonctionnels pour le Data Center. En raison de sa proximité relative avec le village, une évaluation précise des effets potentiels du projet sur le climat local, notamment en ce qui concerne la circulation de l'air et la diffusion thermique, est nécessaire afin de vérifier sa compatibilité avec l'environnement bâti et naturel.

La parcelle concernée par le projet se situe au cœur d'une plaine ouverte, encadrée par des zones forestières à l'est et à l'ouest. Ce cadre naturel contribue à structurer les flux d'air, les forêts agissant comme des barrières ou des filtres selon les conditions thermiques et de vent. Au nord, la topographie s'abaisse progressivement vers une vallée où coule une rivière. Cette déclivité naturelle favorise la descente de l'air frais, notamment durant les périodes nocturnes ou par conditions calmes, contribuant à la formation de corridors de ventilation naturelle.

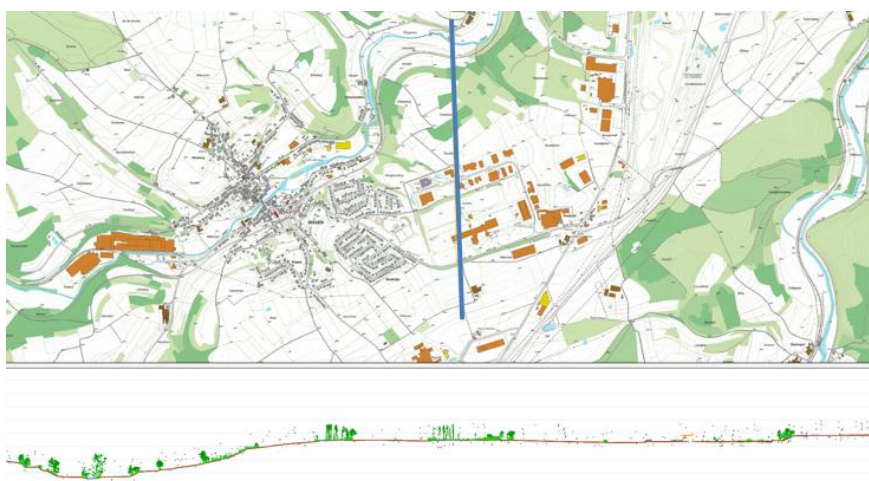


Figure 2 : Coupe topographique nord vers sud



Figure 3 : Coupe topographique est vers ouest

3. Présentation du projet (implantation du Data Center)

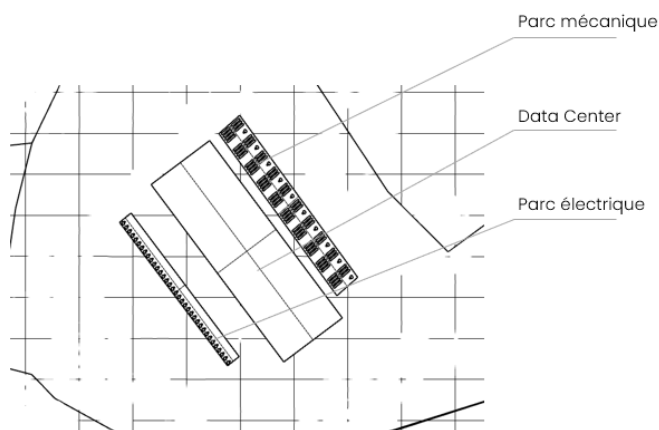


Figure 4 : Situation Data Center

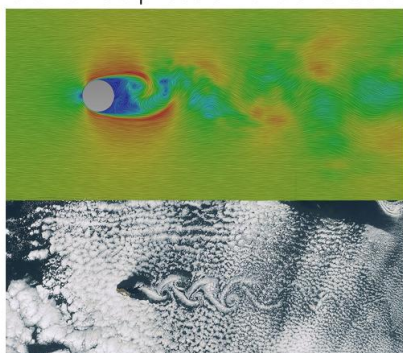
Le projet concerne la construction d'un Data Center équipé de plusieurs installations techniques, dont une cour mécanique avec des groupes de refroidissement, le parc électrique et des bâtiments thermiquement isolés. L'installation fonctionnera en continu, nécessitant un refroidissement constant générant des rejets d'air chaud dans l'environnement immédiat.

Dans le cadre de l'Évaluation des Incidences sur l'Environnement, l'objectif est d'anticiper les impacts potentiels de ces rejets thermiques sur le microclimat local, notamment la circulation de l'air et les variations de température. Cette étude s'appuie sur des simulations CFD afin de quantifier ces effets, en tenant compte notamment du remplacement d'une surface en prairie par une zone imperméabilisée et bétonnée, et, le cas échéant, de proposer des mesures d'atténuation adaptées.

4. Principes généraux de la simulation CFD

La simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) permet de modéliser numériquement le comportement des flux d'air dans un environnement donné. Ce principe repose sur les lois de la mécanique des fluides et permet de reproduire des phénomènes observables dans la nature, comme les déplacements d'air visibles à travers la formation et le mouvement des nuages.

Simulation de pression et de turbulence



Observation dans la nature

Ajout de phénomènes thermiques

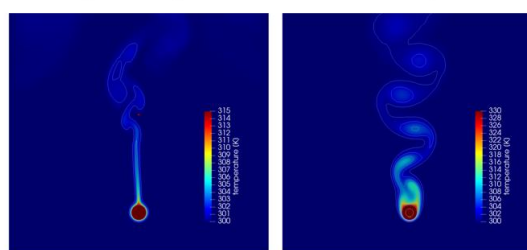


Figure 5 : Exemple de simulation et de cas réel

Dans cette étude, les simulations sont complétées par l'ajout de phénomènes de convection thermique, permettant d'intégrer l'effet des différences de température entre surfaces. Ce couplage vent + thermique permet de simuler à la fois la circulation naturelle de l'air et les effets de rejets de chaleur générés par le Data Center, pour une représentation plus réaliste du comportement atmosphérique local.

Les calculs ont été réalisés en régime stationnaire (steady state), ce qui permet de modéliser une situation stabilisée représentative des conditions les plus fréquentes. Le modèle de turbulence utilisé est le $k-\omega$ SST, adapté pour capter les effets de cisaillement proches des surfaces tout en maintenant une bonne précision dans les zones de recirculation. Les solveurs employés sont PBiCGStab, Smooth Solver, GAMG et PBiCG, assurant une convergence efficace et stable du calcul, même pour des maillages fins et complexes.

5. Présentation des modèles utilisés

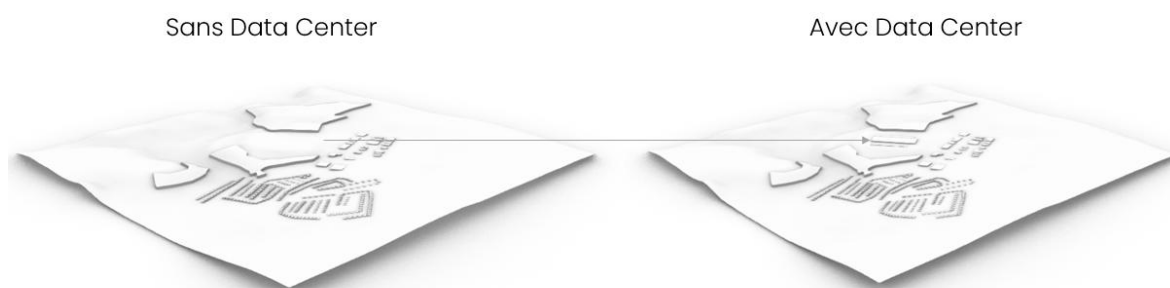


Figure 6 : Vue des modèles avec et sans data center

Deux simulations distinctes ont été réalisées dans le cadre de cette étude : l'une sans la présence du Data Center (état initial du site), et l'autre avec le Data Center modélisé dans sa configuration finale. Cette approche comparative permet d'identifier précisément les impacts liés à l'implantation du projet, en isolant les effets thermiques et aérauliques directement induits par les installations techniques.

Les deux modèles ont ensuite été entièrement fermés, y compris par un plafond numérique placé à 300 mètres d'altitude, afin d'assurer la convergence des calculs dans l'environnement de simulation. Cette hauteur a été choisie de manière à ne pas interférer avec les phénomènes observés à hauteur d'homme, tout en garantissant un cadre de calcul stable. Les conditions aux limites appliquées seront détaillées dans les sections suivantes.

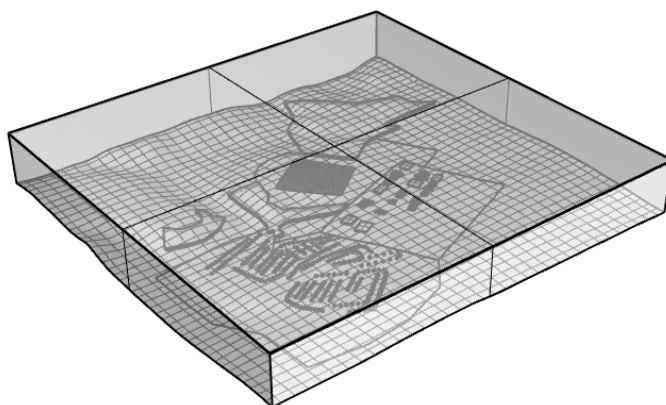


Figure 7 : Vue éloignée du site de simulation

6. Paramètres de maillage

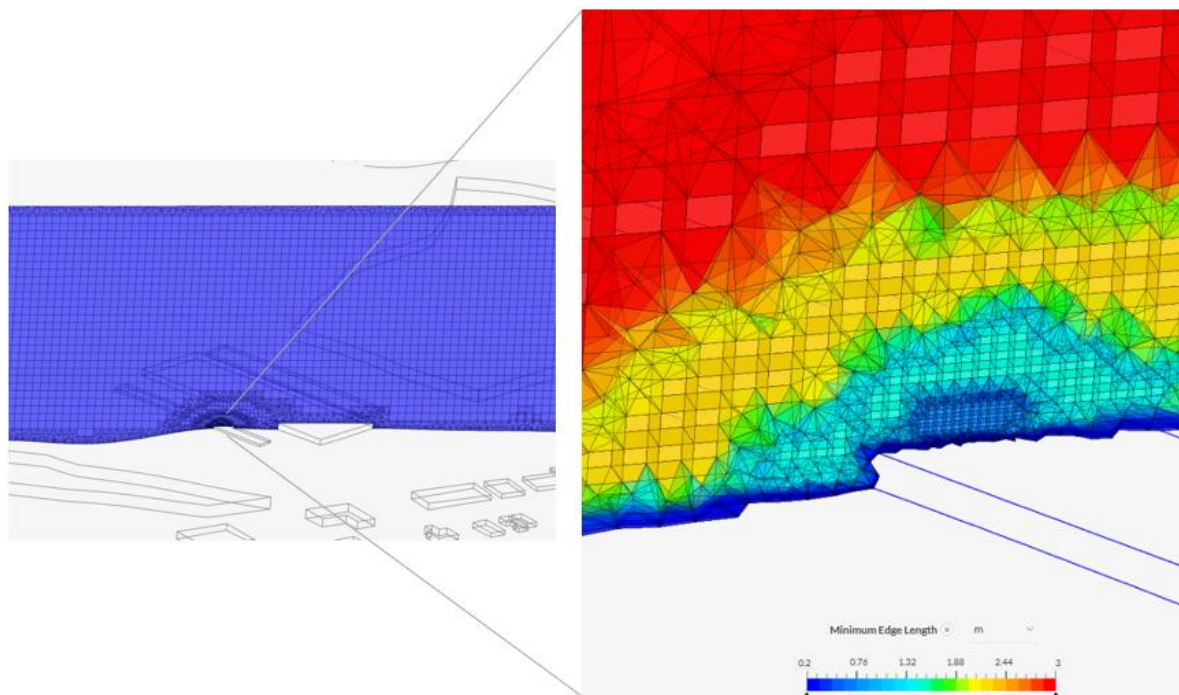


Figure 8 : Vue du maillage ; lointain et zoom

Le maillage du modèle a été élaboré selon une logique adaptative, avec une densité plus élevée dans les zones proches du sol et autour des structures techniques, où les gradients de température et de vitesse de l'air sont les plus marqués. À l'inverse, les mailles sont progressivement élargies en altitude, dans les zones moins sensibles, afin d'optimiser la charge de calcul tout en maintenant une précision suffisante pour la modélisation des vents d'altitude.

Le nombre de mailles a une influence directe sur la complexité et la durée des calculs numériques. Dans le cadre de cette étude, chaque simulation mobilise environ 100 heures de calcul sur une machine de haute performance. Un équilibre a donc dû être trouvé entre la finesse du maillage – essentielle pour garantir la fiabilité des résultats – et la puissance de calcul disponible.

Cette contrainte a également guidé la définition des dimensions du domaine de calcul, notamment la hauteur maximale du modèle, fixée à 300 mètres. Cette limite permet de conserver un environnement suffisamment large pour simuler correctement la dynamique des fluides tout en évitant une explosion du temps de calcul, sans influencer significativement les phénomènes observés à l'échelle humaine.

7. Conditions aux limites

Dans le cadre de cette simulation, deux grands types de conditions aux limites ont été définis afin de modéliser fidèlement les échanges thermiques et les mouvements d'air dans et autour du site.

La première catégorie concerne les conditions liées au projet lui-même, intégrant les caractéristiques physiques et thermiques des nouvelles installations, notamment les bâtiments, les zones techniques et les équipements de refroidissement.

La seconde catégorie regroupe les conditions environnementales, c'est-à-dire les paramètres issus du contexte local : vent, température ambiante, caractéristiques du sol, végétation, etc. Ces deux types de conditions sont décrits dans les sections suivantes.

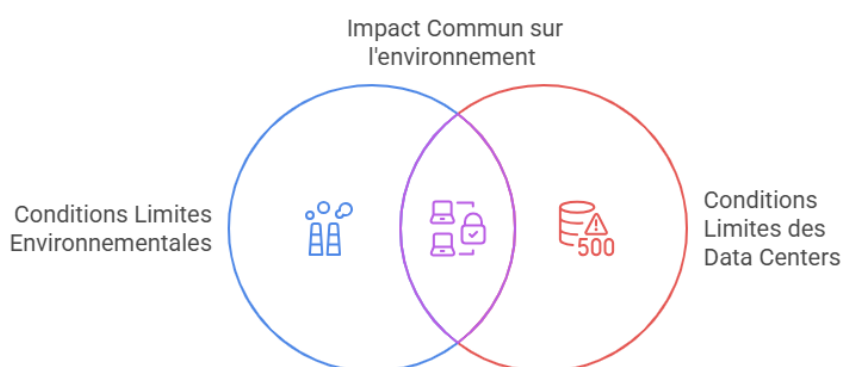


Figure 9 : Représentation visuelle des différents typologies de conditions limites

7.1. Conditions Data Center

Trois zones techniques principales ont été prises en compte dans le modèle : le parc électrique, le bâtiment du Data Center, et la cour mécanique.

Parc électrique : Son utilisation étant peu significative sur l'année en termes de dégagement thermique, elle n'est pas incluse dans la présente modélisation CFD. Son impact potentiel est traité séparément dans le cadre de l'étude relative à la propagation des particules émises par les générateurs.

Bâtiment du Data Center : Ce volume est modélisé comme thermiquement isolé, conformément aux exigences du CPE (Cadre de Performance Énergétique). Il n'émet donc pas de chaleur notable vers l'extérieur et n'influence pas directement les conditions thermiques locales. Toutefois, son implantation en lieu et place d'une surface en prairie peut contribuer, de manière indirecte, à modifier légèrement le microclimat local, en raison notamment de la perte de la capacité de rafraîchissement naturelle du sol végétalisé.

Parc mécanique : Cette zone est le principal point de rejet thermique du projet. Elle regroupe les équipements de refroidissement nécessaires au fonctionnement du Data Center. La puissance de refroidissement totale est estimée à 1,6 MW. Bien que cette puissance ne soit pas directement utilisée dans le calcul, elle est traduite en débit d'air et température de rejet. Sur la base des données techniques fournies (débit d'air : 123,5 m³/s, température extérieure de 35,2 °C), les rejets ont été estimés à 45 °C.

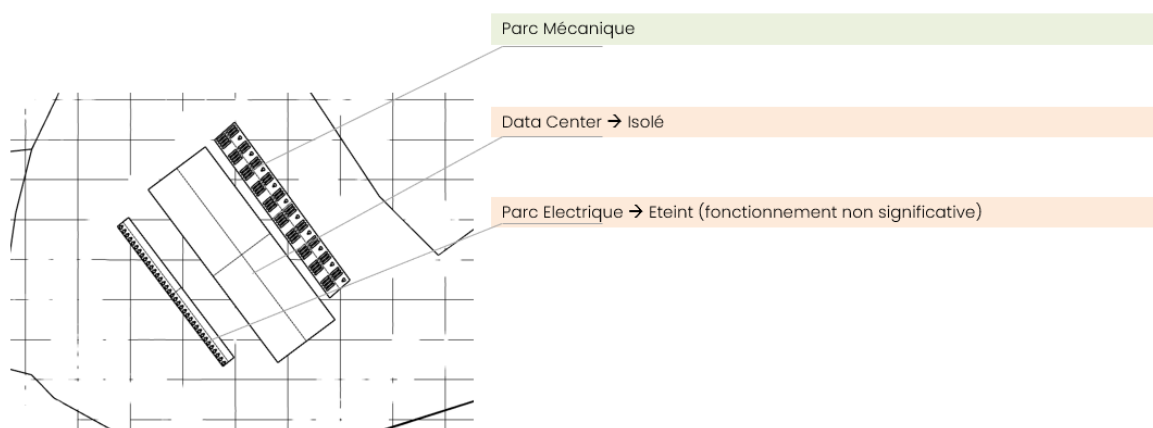


Figure 10 : Repérage des conditions limites liées au projet

Cependant, l'étude étant centrée sur une configuration nocturne (moment plus représentatif pour l'analyse des flux d'air et des impacts thermiques), une température ambiante de 17,5°C a été utilisée. Le ΔT (différentiel thermique) étant constant à puissance équivalente, la température de rejet dans le modèle a été ajustée à 28 °C. Ce choix permet de mieux représenter les impacts potentiels du projet dans des conditions de stabilité atmosphérique accrues, plus sensibles aux effets de réchauffement localisé.

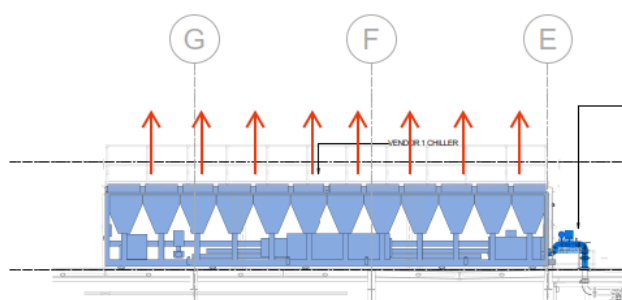


Figure 11 : Vue de côté tour de refroidissement

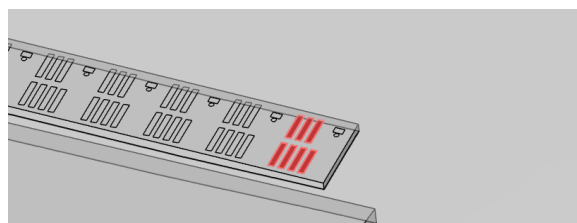
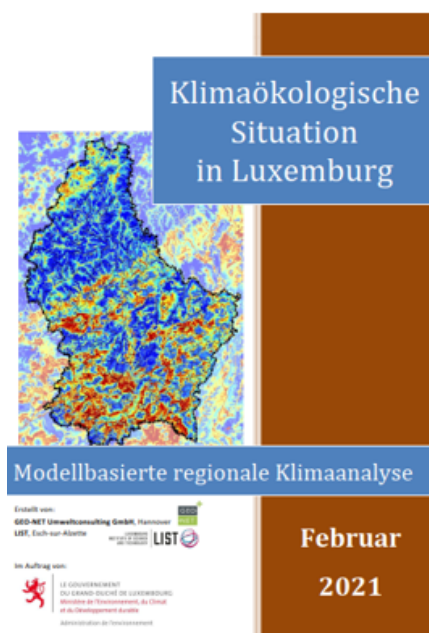


Figure 12 : Exemple d'un bloc de refroidissement

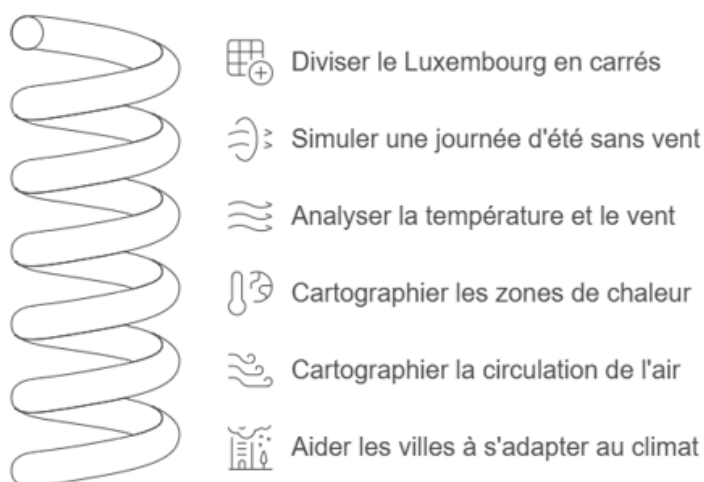
¹ Bien que l'image illustrée ne montre qu'un seul bloc de refroidissement, l'ensemble des équipements de la cour mécanique a été considéré comme en fonctionnement simultané dans la simulation, afin de représenter une situation de charge maximale en période de forte activité.

7.2. Conditions environnementales

7.2.1. Introduction de la méthodologie de définition des conditions limites



Analyse climatique du Luxembourg



La définition des conditions environnementales s'appuie sur l'étude de référence « Klimaökologische Situation in Luxemburg », menée à l'échelle nationale. Cette analyse vise à comprendre le comportement des flux d'air et la répartition thermique au Luxembourg, notamment lors de nuits calmes succédant à des journées chaudes, typiquement vers 4h du matin, période propice à l'observation des effets résiduels de la chaleur accumulée.

L'étude repose sur une modélisation du territoire en carrés de 25 mètres, sur lesquels sont analysés les comportements thermiques et aérauliques en conditions estivales sans vent. En fonction des typologies de sol (forêts, zones agricoles, urbaines, etc.), les variations de température sont relevées, permettant de cartographier les zones de chaleur et de déduire les flux d'air nocturnes induits par les écarts thermiques.

Bien que cette étude présente certaines limites en raison de l'échelle spatiale utilisée et de l'absence de modélisation en trois dimensions, elle constitue une base cohérente pour fixer les conditions initiales de simulations locales. Les tendances identifiées – telles que la ventilation naturelle depuis les zones fraîches (plaines, forêts) vers les zones plus chaudes – permettent d'ancrer les hypothèses environnementales dans un cadre méthodologique reconnu.

7.3. Analyse de résultat de l'étude climatique luxembourgeoise

L'étude climatique luxembourgeoise met en évidence plusieurs tendances nocturnes : les forêts restent légèrement chaudes, en raison de la chaleur accumulée durant la journée ; les plaines sont relativement plus fraîches, grâce à leur capacité à rayonner vers le ciel et à favoriser la circulation d'air. Les zones villageoises présentent des températures plus élevées, en particulier au centre, tandis que les surfaces bétonnées sont significativement plus chaudes que la moyenne. Une plaine plus chaude, atypique, est également identifiée au sud du territoire analysé.

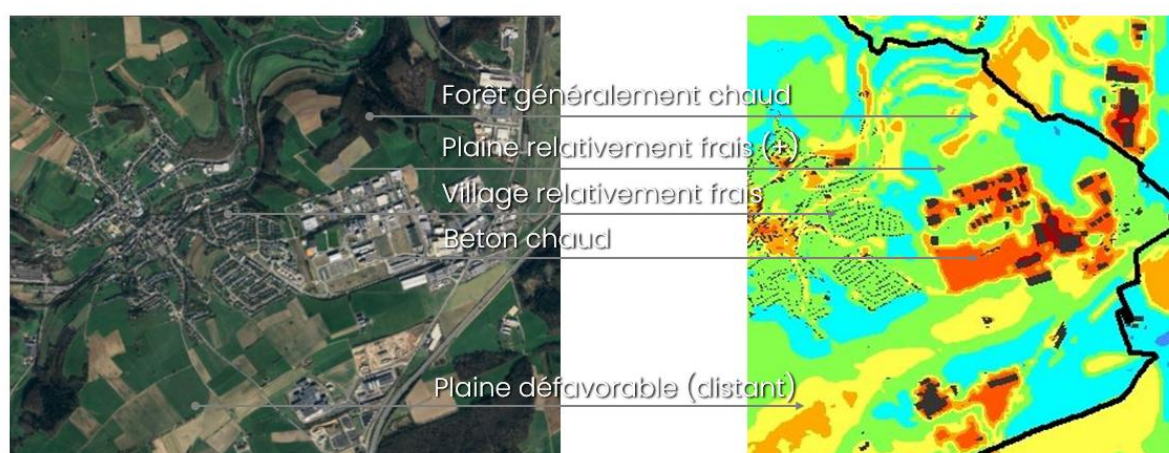


Figure 13 : Identification des zones de températures

Les résultats combinés de température et de flux d'air issus de l'étude climatique montrent que le centre de la plaine prévue pour l'implantation du Data Center présente un débit d'air frais relativement faible, de l'ordre de 5 à 10 m³/(s·m). Les vecteurs indiquent une circulation multidirectionnelle, dont bénéficie le village de Bissen, alimenté par des flux d'air provenant de presque toutes les directions. Seule la façade Est montre une situation plus contrastée, en raison de la présence d'une zone industrielle fortement imperméabilisée et plus chaude. Un certain apport d'air frais en provenance directe de la plaine subsiste néanmoins, renforcé par un flux plus marqué venant de la vallée au nord, identifiée comme zone de génération d'air froid. Une analyse plus fine est poursuivie dans cette étude pour évaluer ces flux potentiels de manière localisée.

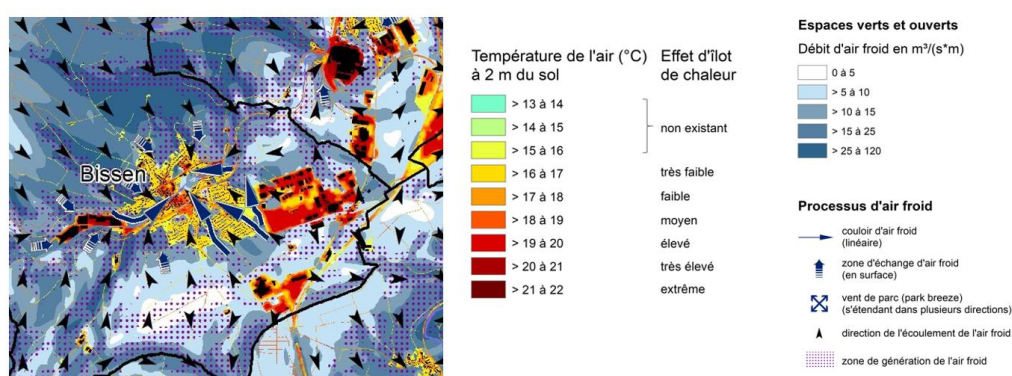


Figure 14 : Résultats combinés

7.4. Définition des conditions limites

Les résultats précédents ont servi de base à la définition des différentes conditions limites, telles qu'illustrées dans le tableau récapitulatif et le schéma de localisation présentés ci-dessous.

	Variante 0 Sans Data Center	Variante 1 Avec Data center
Sol et plaine	15°C	
Sol zone industrielle	19°C	
Sol village	16°C	
Forêt	17°C	
Data center (sol)	15°C	17°C (défavorable)
Machine <u>forid</u>	N.C	28 °C + flow

Figure 15 : Tableau récapitulatif des conditions limites

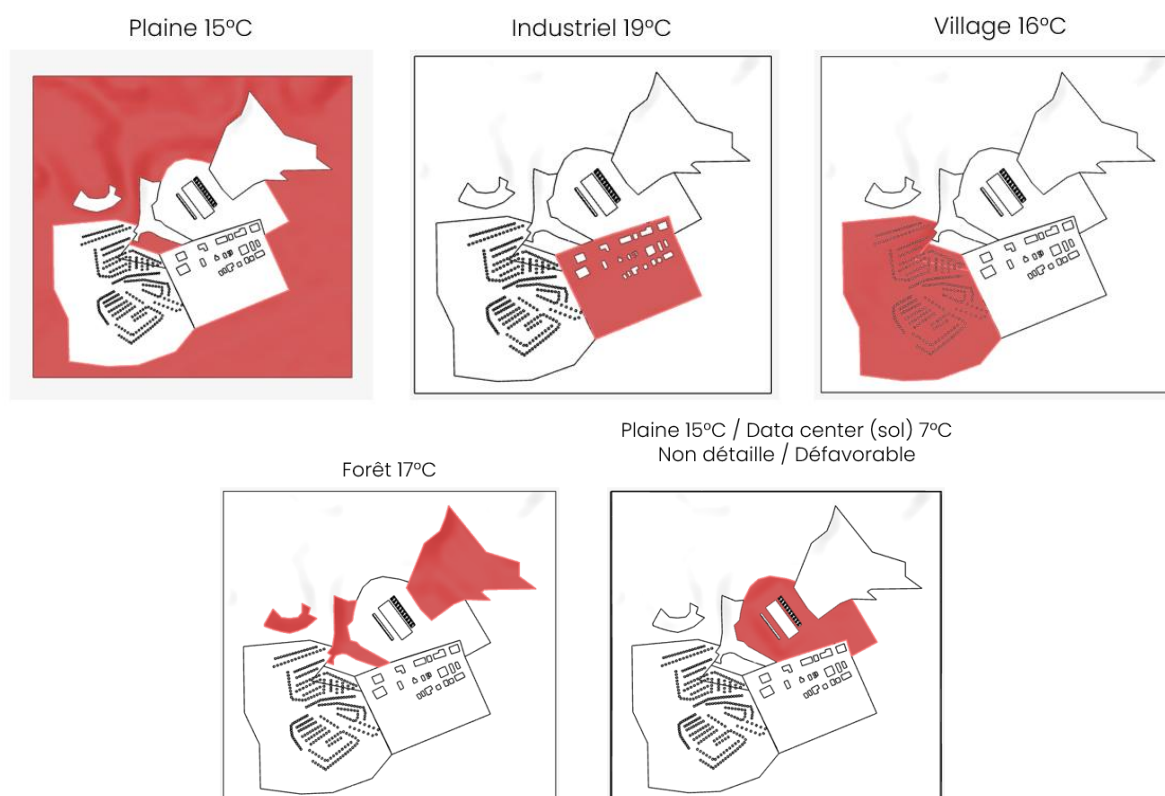


Figure 16 : Repérage graphique des conditions limites environnementales



7.5. Conditions limites générales

Les conditions limites globales retenues pour la simulation sont les suivantes : un vent faible de 1 m/s depuis l'est a été appliqué de manière uniforme afin de permettre la convergence numérique du modèle, sans influencer de manière significative les flux naturels. La température de l'air ambiant a été fixée à 17,5 °C, en cohérence avec les conditions nocturnes analysées. Toutes les autres surfaces non spécifiquement traitées ont été considérées comme adiabatiques, c'est-à-dire sans échange thermique avec leur environnement.

7.6. Limite de comparaison

L'étude climatique à l'échelle nationale constitue un outil précieux de planification territoriale, en fournissant une vision globale des dynamiques thermiques et aérauliques au Luxembourg. Toutefois, certaines limites méthodologiques doivent être prises en compte lors de la comparaison avec la simulation CFD développée dans le cadre de la présente étude.

Contrairement à la modélisation locale, l'étude nationale n'intègre pas d'analyse tridimensionnelle détaillée, se basant essentiellement sur des observations en surface (2D). De plus, le maillage utilisé dans la présente simulation CFD est significativement plus fin, permettant une meilleure résolution spatiale, notamment à proximité du sol, des bâtiments et des zones techniques.

Ces différences de résolution et de profondeur d'analyse expliquent les écarts potentiels entre les deux approches. L'étude CFD vise ainsi à compléter les résultats globaux en apportant un niveau de précision local indispensable à l'évaluation environnementale d'un projet d'aménagement spécifique.

RESULTATS DE LA SIMULATION – SCENARIO SANS DATA CENTER

1.Température de l'air (coupe horizontale)

De manière générale, les résultats obtenus par la simulation CFD sont globalement cohérents avec les conclusions de l'étude climatique nationale. Toutefois, la précision accrue du modèle CFD, associée à une analyse tridimensionnelle plus détaillée, permet de mettre en évidence certaines différences localisées.

Deux écarts principaux ont été identifiés :

- Une zone froide au sud, correspondant à la plaine située en contrebas du site. Cette zone avait initialement été identifiée comme relativement chaude dans l'étude nationale. Toutefois, une cartographie complémentaire (cf. figure 14) la qualifie de "zone de production d'air frais", ce qui vient confirmer la validité des résultats de la simulation locale.
- Une forêt légèrement plus froide dans le modèle CFD, par rapport aux estimations précédentes. Cette différence peut s'expliquer par la capacité du modèle à représenter plus finement les échanges thermiques verticaux, ainsi que par une prise en compte plus détaillée de la topographie et des interactions avec les zones voisines.

Ces écarts soulignent l'intérêt d'une approche locale en complément des études globales, afin d'obtenir une évaluation plus précise des dynamiques microclimatiques à l'échelle d'un projet.

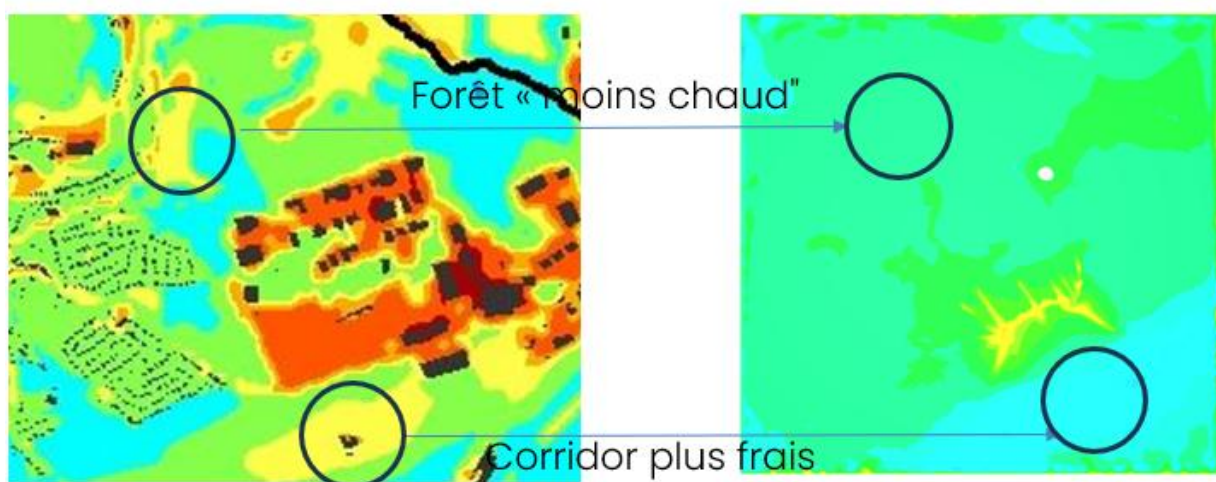


Figure 17 : Comparaison des résultats : à gauche l'étude nationale, à droite le résultat de l'analyse CFD

2. Circulation de l'air (vecteurs de vent)

2.1. Résultats CFD

Dans le cadre de la simulation, un vent léger de 1 m/s en provenance de l'est (soit environ 3,6 km/h) a été introduit afin de favoriser la convergence numérique du calcul. Toutefois, les résultats montrent que ce flux initial n'exerce pas une influence dominante sur la dynamique globale de l'air dans la zone étudiée.

De manière générale, l'air frais tend naturellement à se diriger vers les zones plus chaudes à un niveau proche du sol, en suivant les gradients thermiques et la topographie. Dans ce contexte, la plaine accueillant la parcelle du Data Center se comporte comme une source d'air frais, alimentant principalement la zone industrielle au sud, ainsi que les autres plaines situées au nord. Ce comportement confirme la logique des mouvements d'air observés dans des situations nocturnes calmes, où les différences de température dictent les flux à petite échelle.

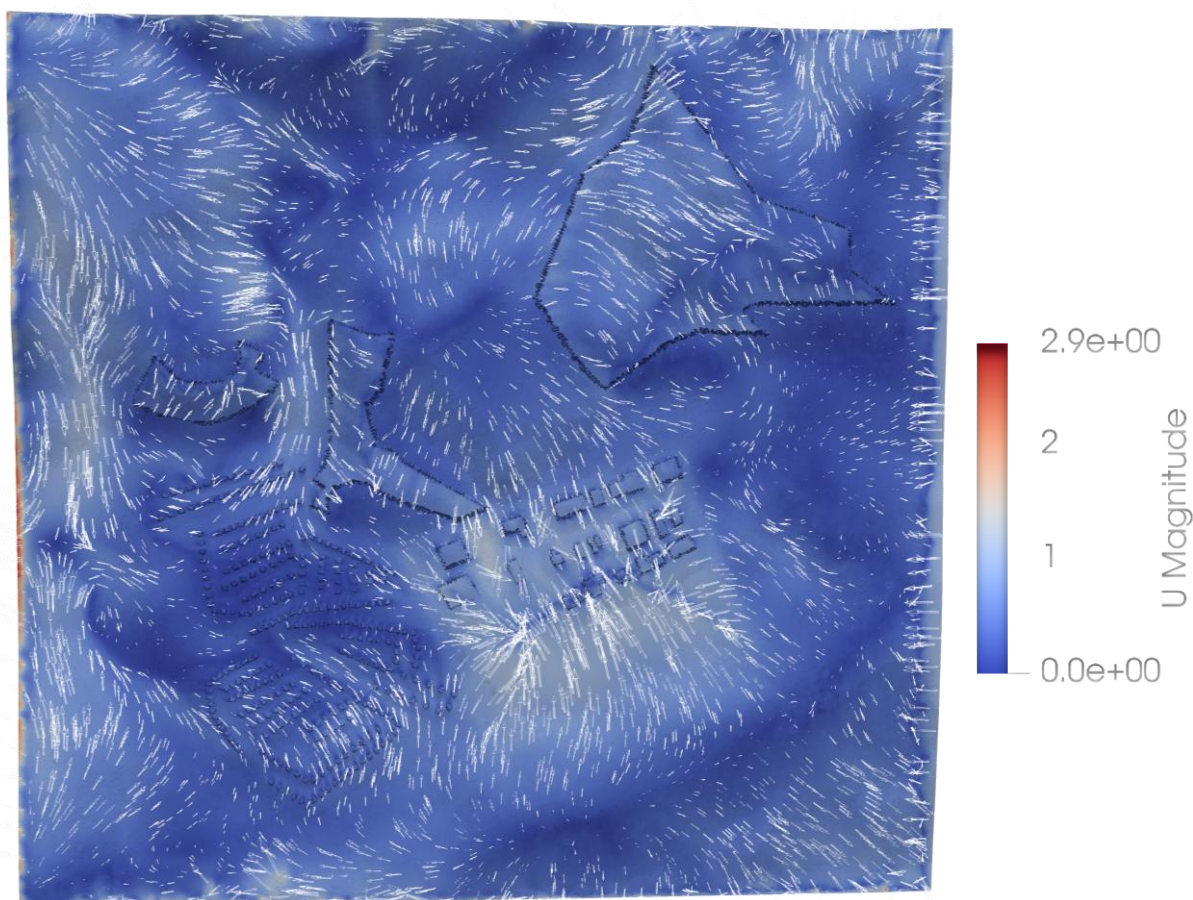


Figure 18 : Vecteurs de l'air

2.2. Comparaison avec l'étude nationale

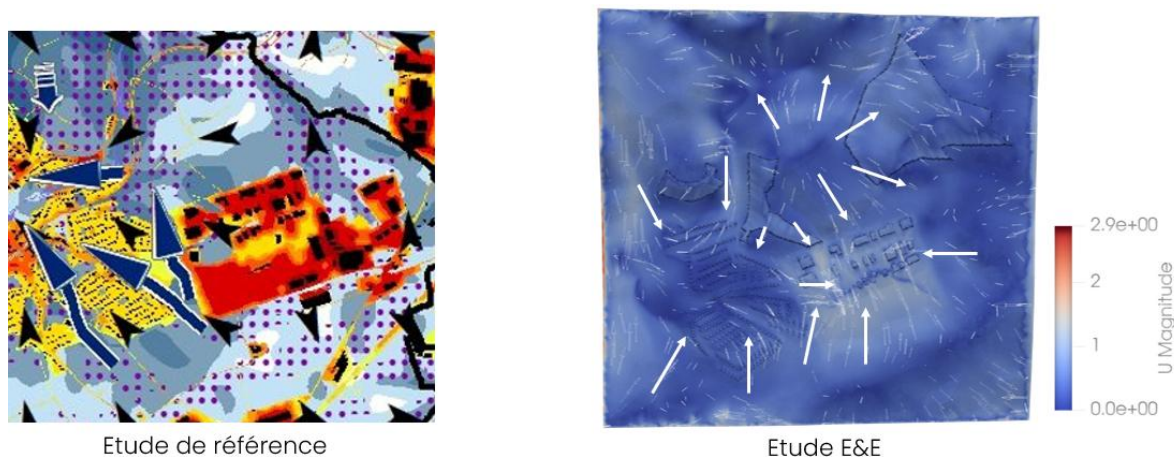


Figure 19 : Comparatif des vecteurs d'air

La comparaison avec l'étude climatique nationale permet également d'identifier certaines différences dans les vecteurs de vent. De manière générale, les orientations et dynamiques observées sont globalement cohérentes, malgré les différences d'échelle entre les deux approches. Le village de Bissen bénéficie d'un apport d'air frais provenant de plusieurs directions, ce qui est confirmé à la fois dans les résultats de la simulation CFD et dans l'étude de référence.

La principale divergence observée concerne la zone industrielle : dans la simulation CFD, cette zone semble attirer davantage d'air frais environnant, tandis que dans l'étude nationale, elle apparaît plutôt comme une source de chaleur, transmettant des flux plus chauds vers l'ouest (en direction du village) ou vers le sud, en direction de la plaine.

Ces écarts peuvent s'expliquer par la résolution spatiale et la nature des modèles employés. Toutefois, ils ne traduisent pas une contradiction majeure, mais plutôt des nuances liées à la précision et à l'échelle d'observation propre à chaque méthode.

3. Corridors d'air frais identifiés

La simulation met en évidence l'existence de deux corridors principaux d'air frais alimentant le village de Bissen, situés respectivement au nord et au sud de la zone d'étude. Ces flux jouent un rôle central dans la ventilation naturelle du site.

En revanche, l'air frais ne provient pas directement de la plaine située au-dessus de la zone industrielle, car cette dernière est partiellement isolée par une zone forestière, agissant comme une barrière naturelle qui limite la progression des flux d'air vers le village depuis l'est.

Même si les flux d'air ne semblent pas provenir directement de la plaine, l'implantation du projet sur cette dernière pourrait altérer l'équilibre actuel, notamment en modifiant les gradients thermiques et les régimes locaux de circulation. Il apparaît donc pertinent de poursuivre l'analyse de manière approfondie, afin d'identifier d'éventuelles modifications à long terme de la dynamique microclimatique du site.

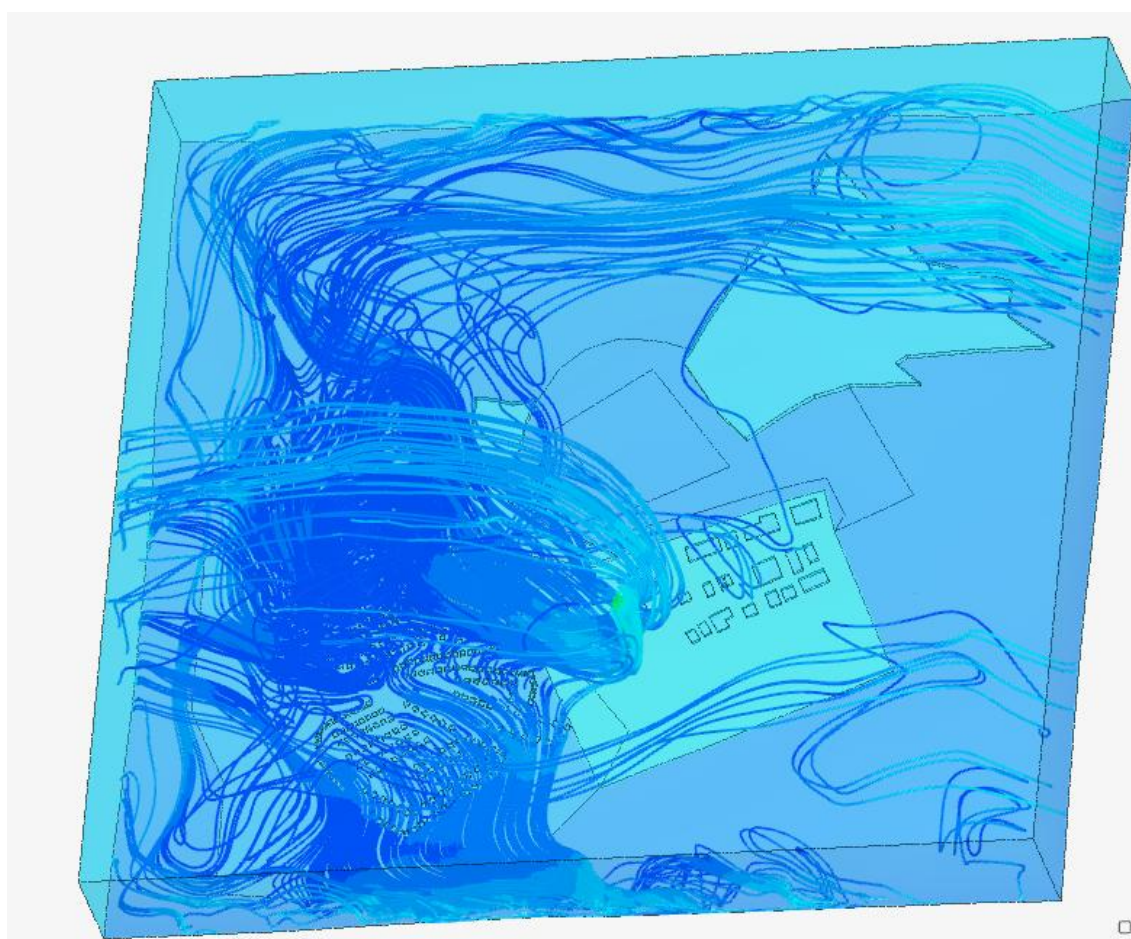


Figure 20 : Représentation 3D des flux d'air arrivant au village de Bissen

RESULTATS DE LA SIMULATION – SCENARIO AVEC DATA CENTER

1.Température de l'air et gradients thermiques

La simulation met en évidence la présence d'un flux d'air chaud émis par les groupes de refroidissement situés dans la cour mécanique du Data Center. Ce flux suit une propagation verticale naturelle, portée par les différences de densité entre l'air chaud rejeté et l'air ambiant plus frais.

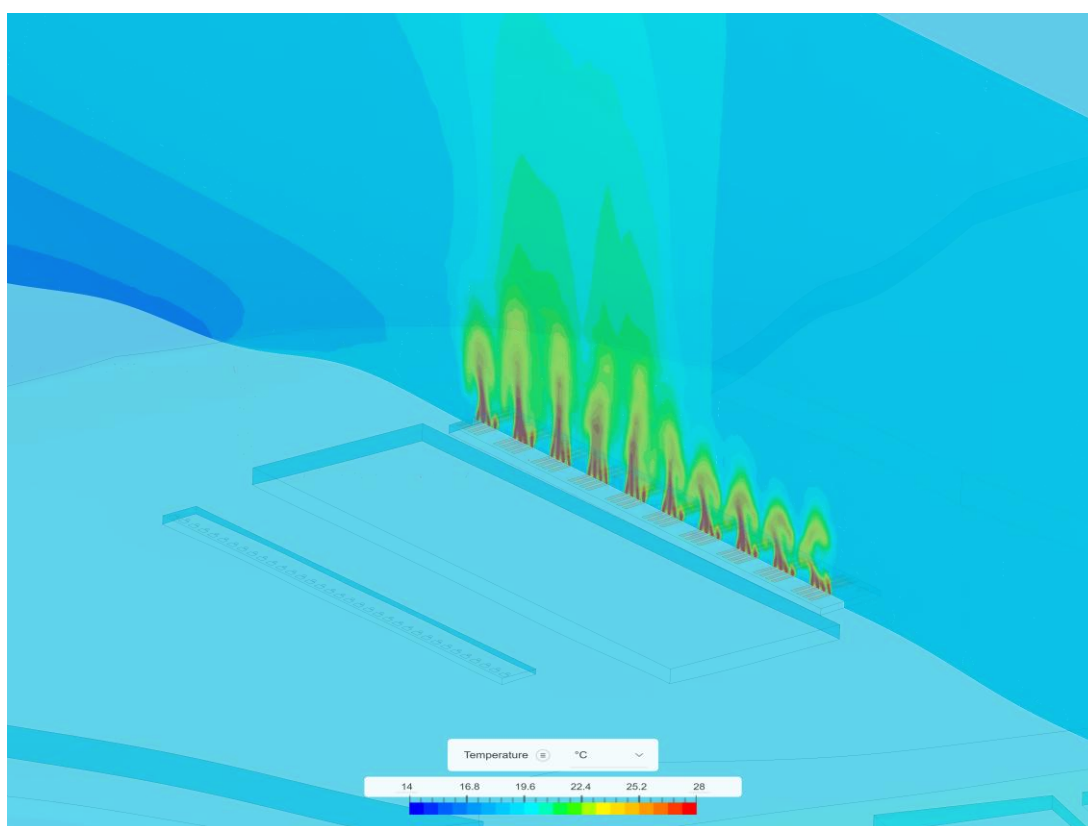


Figure 21 : Coupe verticale température d'air

Cette dynamique est encore plus lisible à une échelle plus large, avec un zoom éloigné et une échelle adaptée, permettant une meilleure visualisation des variations de température dans l'environnement immédiat. Il apparaît que l'impact thermique est concentré au-dessus de la source d'émission, c'est-à-dire directement au niveau des équipements, sans extension notable vers les zones habitées.

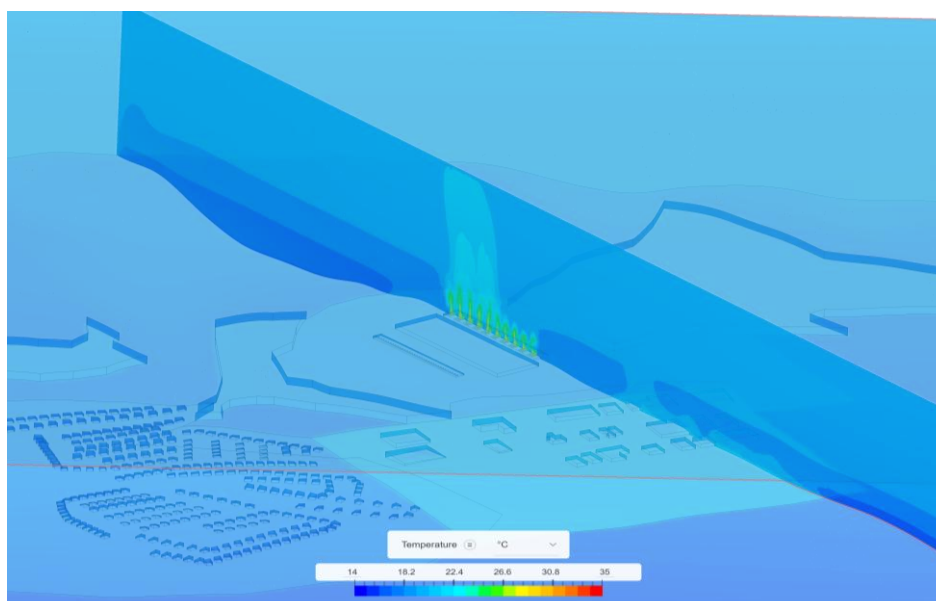


Figure 22 : Coupe verticale température d'air, grand zoom

Une coupe verticale illustrant les variations de température entre le Data Center et le village montre que le panache de chaleur reste confiné au-dessus de la zone technique. À ce stade de l'analyse, aucun impact thermique significatif n'est observé sur les zones résidentielles, ni sur les plaines ni les surfaces forestières environnantes.

L'analyse détaillée des différences entre la situation avant et après implantation sera présentée dans un chapitre ultérieur, consacré à la comparaison directe des deux scénarios simulés.

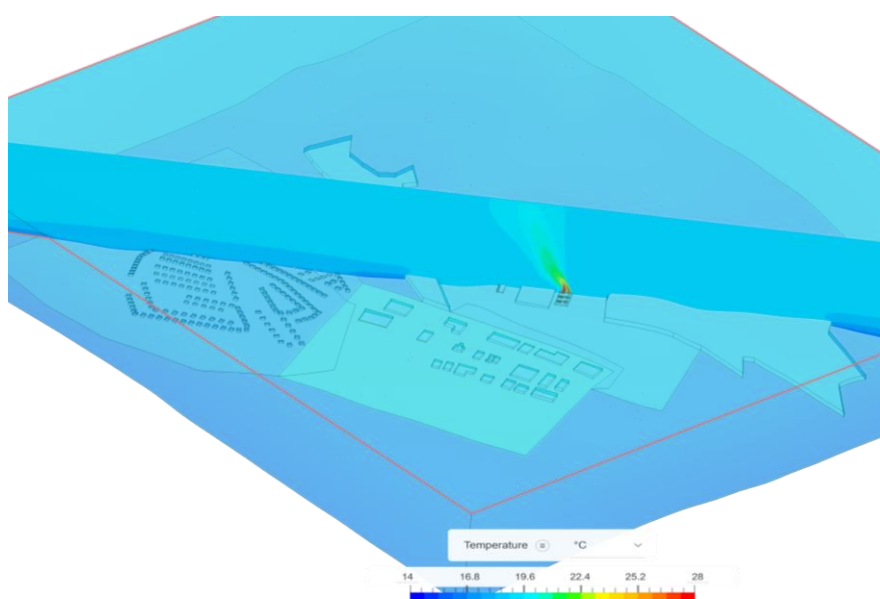


Figure 23 : Coupe verticale de température impact sur le village

2. Vecteur de flux d'air

La modélisation des vecteurs de vent a été réalisée à une altitude de 2 mètres au-dessus de chaque surface de référence, incluant le sol naturel, les zones forestières et les toitures des bâtiments. Les résultats obtenus présentent une configuration globalement similaire à celle décrite précédemment, en l'absence du Data Center.

Ces données serviront de base de comparaison directe dans le chapitre suivant, qui analysera les évolutions spécifiques entre les deux scénarios, avant et après l'implantation du projet.

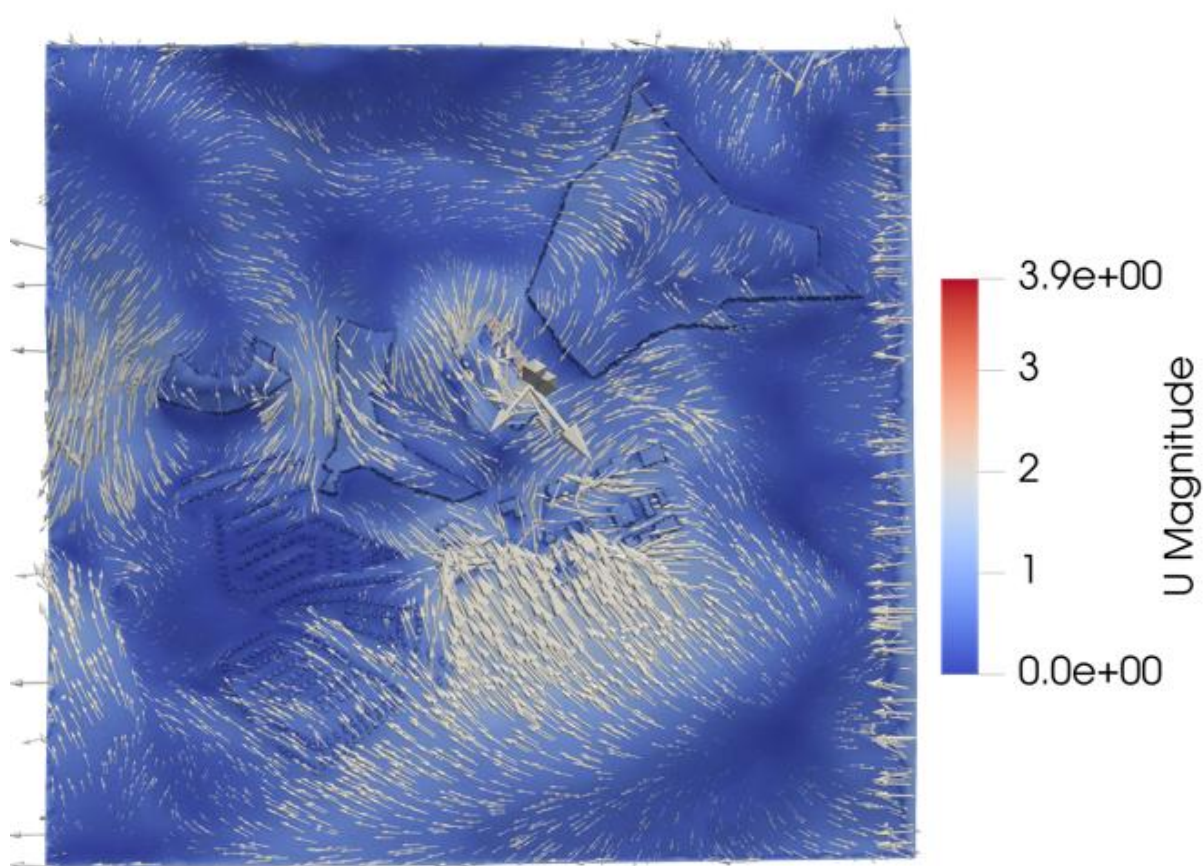


Figure 24 : Vecteur de vent en présence du data center

ANALYSE COMPARATIVE ET INTERPRETATION

Ce chapitre vise à mettre en perspective les résultats des deux scénarios simulés, avec et sans la présence du Data Center. L'objectif est d'identifier de manière précise les éventuelles modifications apportées au microclimat local, en termes de température, de flux d'air et de distribution thermique. L'analyse se concentre à la fois sur les impacts localisés (proximité immédiate du projet) et sur les évolutions à plus large échelle, permettant d'en tirer des conclusions sur la compatibilité environnementale de l'implantation.

1.Circulation de l'air (évolution des vecteurs de vent)

La présence du Data Center modifie localement la dynamique des vents, en particulier au niveau de la parcelle du site. La création d'une zone de sol réchauffé, combinée aux besoins en air frais des installations, génère une aspiration de l'air depuis le nord et l'est.

Avant l'implantation, la plaine présentait une tendance naturelle à expulser l'air vers le nord et le sud. Malgré cette nouvelle zone d'appel d'air, les vecteurs de vent nord-sud en direction du village de Bissen restent globalement stables et peu perturbés.

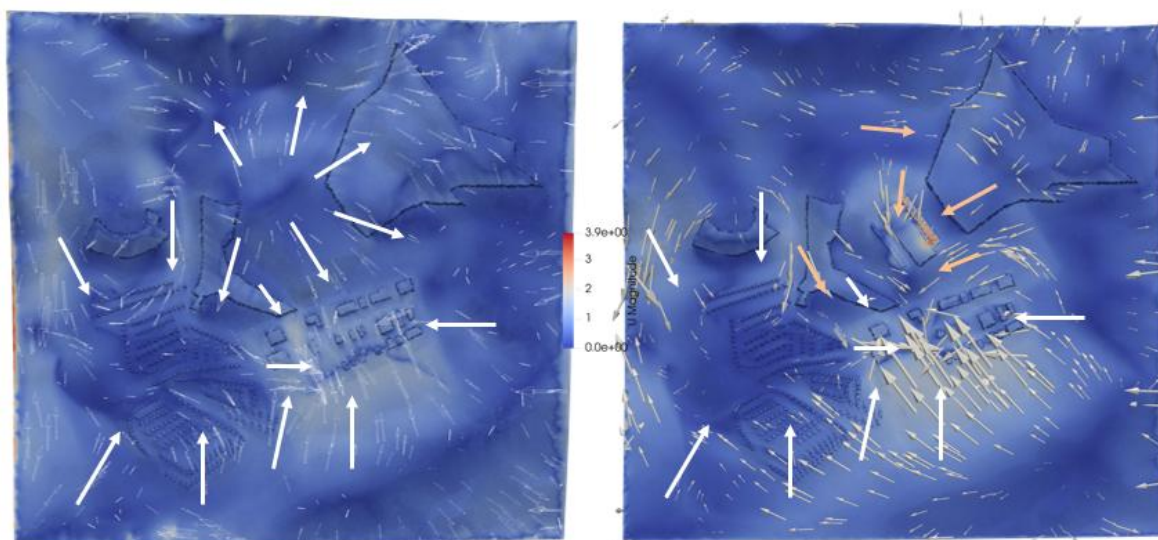


Figure 25 : Comparaison des vecteurs d'air frais

2. Température de l'air et gradients thermiques

Les deux sous-chapitres suivants présentent une analyse comparative des évolutions de température entre la parcelle du projet et, respectivement, le village de Bissen puis la zone d'activité économique située au sud. Cette approche permet d'évaluer les modifications éventuelles des gradients thermiques induits par l'implantation du Data Center et d'identifier les zones potentiellement sensibles à ces variations.

2.1. Interaction Parcelle projet / Village

L'analyse comparative de la coupe verticale du gradient de température entre les deux scénarios met en évidence plusieurs éléments clés :

- Au-dessus du Data Center, une élévation marquée de la température est observée, résultant directement de la remontée verticale du panache d'air chaud généré par les équipements de refroidissement. L'augmentation moyenne dans cette zone atteint environ $+4^{\circ}\text{C}$, selon le volume pris en considération.
- Une hausse de température plus modérée, de l'ordre de $+2^{\circ}\text{C}$, est également notée au niveau de la parcelle elle-même. Cette variation s'explique par les conditions limites définies dans le modèle, qui tiennent compte de la transformation du sol liée au projet. Dans le scénario avec Data Center, le sol est supposé plus imperméable et thermiquement inerte (ex. : surfaces bétonnées), ce qui favorise une accumulation de chaleur.
- Enfin, au-delà de la lisière forestière, dans les zones de plaine et dans le village de Bissen, aucune variation significative de température ne peut être attribuée à l'implantation du Data Center. L'impact thermique dans ces zones est donc estimé comme nul dans le cadre de cette simulation.

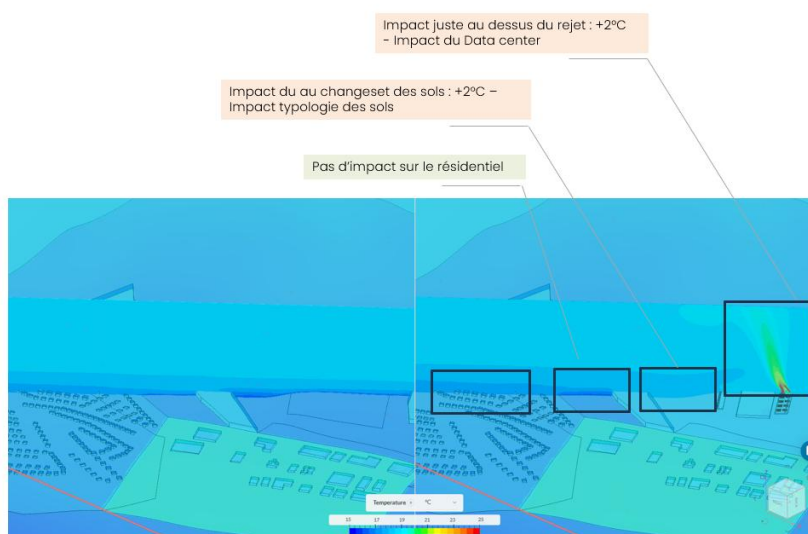


Figure 26 : Comparaison des gradients de températures (à gauche sans data center, à droite avec data center)

2.2. Interaction Parcelle projet / Zone d'activité économique

La seconde analyse du gradient de température, cette fois en direction de la zone d'activité économique, présente des observations similaires à celles relevées dans le cas du village, avec toutefois quelques nuances dans l'interprétation :

- Comme précédemment, une augmentation de 2 °C des conditions limites a été appliquée sur la parcelle du projet, ce qui se retrouve naturellement dans les résultats simulés.
- Dans la zone en contact direct avec la parcelle, une hausse de température d'environ +1 °C est observée. Cette élévation est principalement due à la modification de la typologie de sol, en particulier la réduction de l'albédo et l'augmentation de l'imperméabilisation de la parcelle voisine. Ce phénomène est donc lié à l'artificialisation du terrain en tant que tel, et non directement aux rejets thermiques du Data Center. Une évolution similaire aurait pu être constatée avec tout autre type d'aménagement urbain.
- Enfin, dans les zones plus éloignées, aucune variation de température significative n'est relevée. L'impact thermique du Data Center sur ces secteurs éloignés est donc considéré comme inexistant.

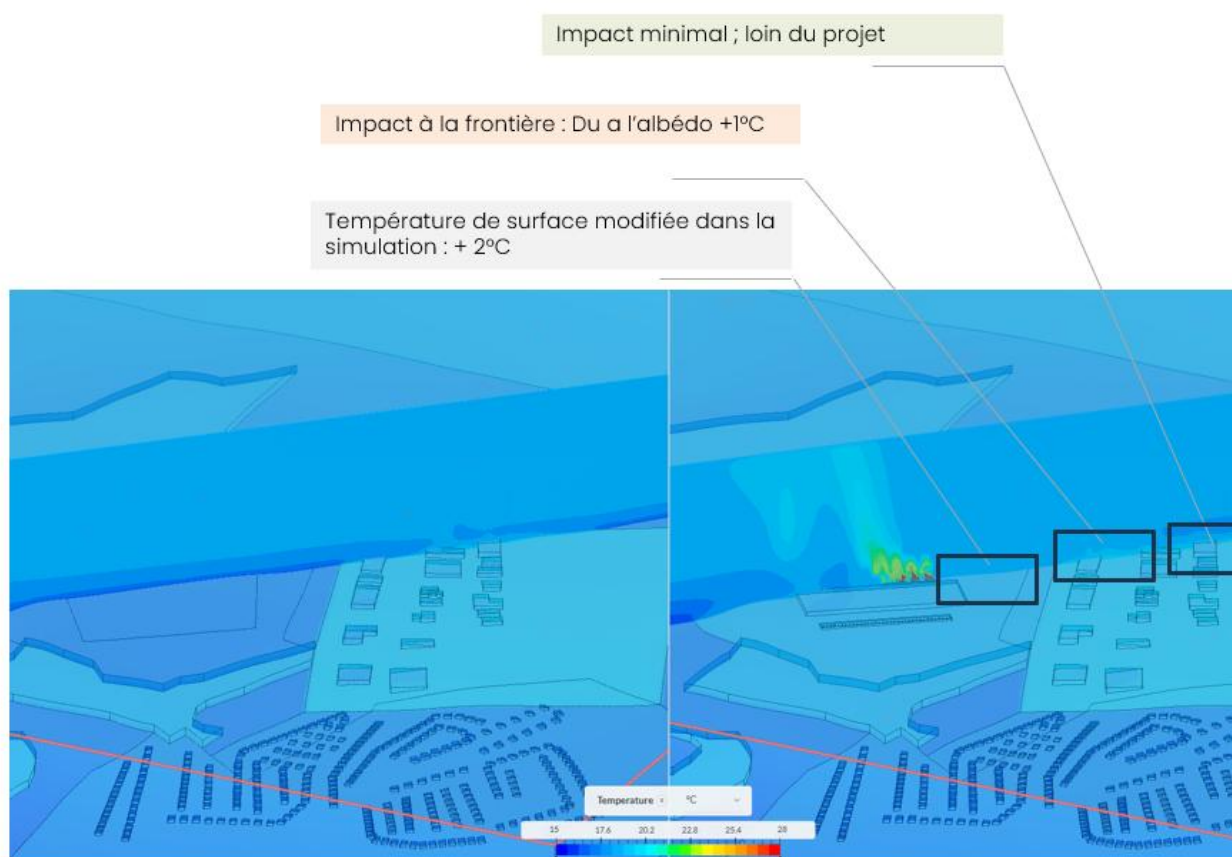


Figure 27 : seconde comparaison des gradients de températures (à gauche sans data center, à droite avec data center)

3. Évolution des corridors d'air frais

La comparaison des scénarios avant et après l'implantation du Data Center montre que les corridors d'air frais en provenance du nord et du sud restent globalement inchangés pour le village de Bissen. La présence du Data Center n'altère pas la structure principale des flux naturels, qui continuent de contribuer à la ventilation du secteur résidentiel.

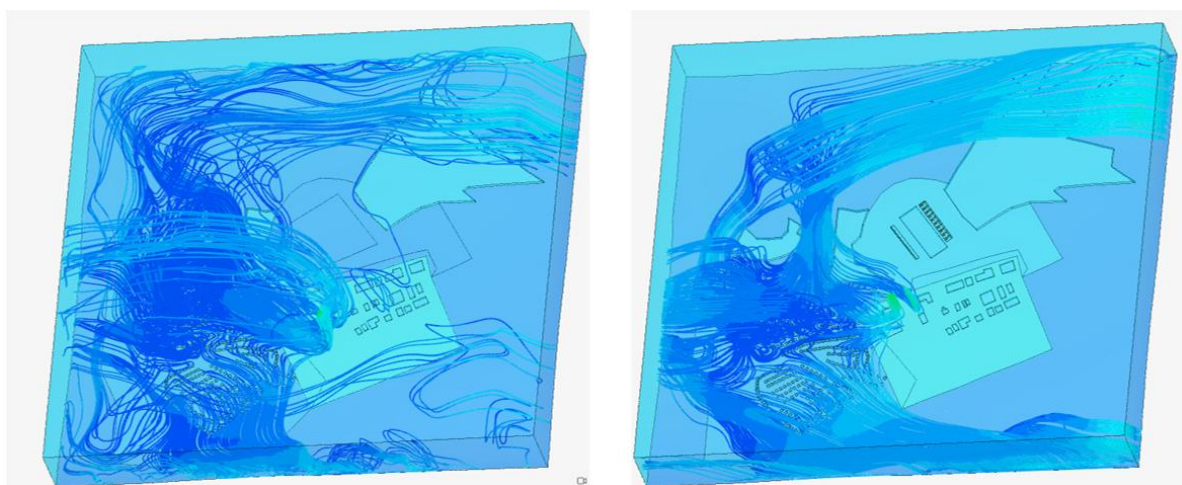


Figure 28 : Comparaison des flux d'air en direction du village (à gauche sans data center, à droite avec data center)



CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

1. Résumé des impacts mesurés

L'analyse comparative entre les scénarios avec et sans Data Center permet de tirer les conclusions suivantes concernant les impacts sur le microclimat local :

Impact thermique localisé :

- Une élévation de température de +4 °C est observée directement au-dessus des équipements de refroidissement, en lien avec la remontée du panache d'air chaud.
- Une augmentation d'environ +2 °C est constatée au niveau de la parcelle du Data Center, principalement liée à l'artificialisation du sol (albédo plus faible, matériaux imperméables).
- Dans les zones résidentielles et naturelles environnantes (village, plaines, forêts), aucune variation significative de température n'a été relevée.

Circulation de l'air :

- Les corridors d'air frais en provenance du nord et du sud restent fonctionnels et ne sont pas perturbés par le projet.
- Une modification locale des vecteurs de vent est observée au niveau de la parcelle, avec une aspiration d'air depuis le nord et l'est, liée à la présence du sol réchauffé et à la demande en air frais.
- Aucun impact notable sur la ventilation du village ou des zones plus éloignées n'a été identifié.

Zones sensibles :

- La zone d'activité économique au sud enregistre une légère hausse de température (+1 °C) au contact direct de la parcelle, principalement attribuable au changement de nature du sol, et non aux rejets thermiques du Data Center.
- Aucune influence significative n'a été détectée au-delà de la parcelle et de ses abords immédiats.

2. Compatibilité du projet avec le climat local

Les résultats indiquent que le projet présente une compatibilité globalement satisfaisante avec le climat local, bien que certains impacts localisés soient observés. La zone directement au-dessus des rejets de la cour mécanique montre une élévation thermique notable, et une hausse modérée des températures de surface est constatée sur la parcelle, en lien avec la modification des caractéristiques du sol.

Un léger impact est également observé sur le voisinage immédiat, notamment à la limite avec la zone d'activité économique, équivalent à l'impact qui serait observable dans toute situation comprenant un agrandissement de cette zone d'activité. En revanche, aucun effet significatif n'est détecté sur le village de Bissen, sur les corridors naturels de ventilation, ni sur la majeure partie des zones environnantes. L'équilibre microclimatique régional est donc largement préservé dans le cadre de cette modélisation.

3. Validité du modèle par rapport aux données réelles et limite de l'étude

Le modèle CFD mis en œuvre dans cette étude repose sur une série d'hypothèses simplificatrices, nécessaires à toute modélisation numérique : conditions stationnaires, climat homogène, idéalisation partielle du terrain et des matériaux. Ces choix limitent la représentation de la complexité dynamique réelle de l'atmosphère, mais permettent de cibler efficacement les ordres de grandeur des impacts liés à l'implantation du Data Center.

La simulation ne prétend pas reproduire avec exactitude tous les phénomènes environnementaux, mais elle offre un cadre robuste d'analyse comparative, suffisant pour apprécier les effets relatifs du projet sur son environnement immédiat. Les résultats obtenus s'inscrivent dans une continuité logique avec les tendances identifiées à l'échelle régionale, tout en apportant une lecture plus fine des impacts localisés.

Comme souvent en climatologie urbaine, le moindre déséquilibre peut potentiellement influencer l'ensemble d'un système, à l'image du célèbre adage selon lequel *le battement d'ailes d'un papillon peut provoquer un ouragan à l'autre bout du monde*. C'est précisément dans cette perspective que la simulation prend tout son sens : elle permet de différencier les effets réels des perturbations minimales, et de mieux anticiper les interactions entre projet et environnement.

Enfin, pour enrichir cette analyse, une campagne de mesures in situ pourrait être envisagée. Il conviendrait de la débiter en amont des travaux, afin d'établir un état de référence détaillé. Il faut toutefois garder à l'esprit qu'attribuer formellement d'éventuelles évolutions à la seule présence du Data Center restera complexe, en raison de la variabilité naturelle du climat local.

4. Variantes architecturales et techniques : un impact limité

L'étude a reposé sur la modélisation de deux configurations principales : une première représentant l'état actuel de la plaine, sans aménagement, et une seconde intégrant l'implantation d'un data center. Cette seconde configuration aurait pu donner lieu à l'exploration de variantes supplémentaires, notamment architecturales — concernant l'orientation du bâti (selon les axes Est/Ouest ou Nord/Sud) ou sa répartition spatiale — ainsi que techniques, telles que l'inversion des localisations des parcs mécaniques et électriques.

Cependant, les résultats issus de la modélisation de la variante intégrant le data center permettent de tirer un certain nombre de conclusions suffisamment robustes pour en limiter la portée exploratoire. En particulier, l'analyse a montré que les phénomènes les plus marquants, notamment le développement du panache thermique, se concentrent au-dessus des équipements de type refroidisseurs. Ces effets se révèlent relativement indépendants de leur orientation précise ou de leur emplacement dans la parcelle. Il apparaît par ailleurs que les écarts constatés dans la structure des flux sont principalement liés à l'existence et à la configuration des surfaces bâties elles-mêmes, davantage qu'à leur orientation ou au détail du positionnement des équipements techniques.

En complément, les corridors d'air frais, parfois évoqués comme facteurs pouvant influencer la dispersion ou la dilution des panaches, ne traversent pas de manière significative la plaine dans la configuration étudiée. Leur contribution au bilan global reste donc secondaire.

Ainsi, les variantes initialement envisagées ne sont pas susceptibles, au vu des dynamiques identifiées, de modifier de façon notable les résultats obtenus dans le cadre de la configuration modélisée. Leur impact est considéré comme marginal au regard des phénomènes dominants observés, et ne justifie pas, à ce stade, une modélisation détaillée supplémentaire. Cette position s'inscrit dans une logique de proportionnalité des efforts de simulation, sans préjuger de la possibilité d'investigations complémentaires si de nouvelles contraintes venaient à apparaître en phase de développement ultérieure.

5. Mesures d'atténuation passive

Les impacts thermiques observés étant principalement liés à la modification des sols, il est recommandé de limiter l'imperméabilisation, de préserver des zones végétalisées autant que possible, et d'optimiser l'albédo des surfaces en favorisant des matériaux clairs. Ces mesures simples permettent de réduire le réchauffement en surface et de préserver l'équilibre thermique local.

5.1. Réduction de l'imperméabilisation

La réduction de l'imperméabilisation contribue à limiter le réchauffement des surfaces en permettant une meilleure infiltration de l'eau et un échange plus direct entre le sol et l'atmosphère. Contrairement aux matériaux imperméables, les surfaces perméables retiennent moins la chaleur et favorisent les processus de refroidissement naturel, comme l'évaporation et la transpiration des sols. Cela permet de réduire la température en surface, particulièrement en période nocturne, et de préserver les équilibres thermiques locaux.

5.2. Maintien des zones végétalisées

Le maintien de zones végétalisées constitue une mesure efficace pour limiter l'élévation des températures en surface. La végétation contribue à refroidir l'air ambiant grâce à l'évapotranspiration, tout en offrant une protection contre l'accumulation directe de chaleur solaire. Ces surfaces jouent également un rôle de tampon thermique, en régulant les variations de température entre le jour et la nuit. Préserver ou intégrer des éléments végétaux dans l'aménagement permet ainsi de stabiliser le microclimat local et de limiter les effets liés à l'artificialisation du sol.

5.3. Optimisation de l'albédo des surfaces

L'optimisation de l'albédo consiste à utiliser des matériaux de surface plus réfléchissants afin de réduire l'absorption du rayonnement solaire. Cette approche permet de limiter l'échauffement des surfaces et contribue à maintenir des températures plus basses au niveau du sol, notamment en période estivale. Toutefois, son effet reste essentiellement diurne, et son efficacité dépend du type de revêtement et de son entretien. Cette mesure doit donc être envisagée comme complémentaire à d'autres stratégies d'aménagement, notamment la végétalisation et la gestion de la perméabilité des sols.

6. Suggestions pour le développement du projet

Pour les phases futures du projet, il est recommandé d'intégrer dès la conception les principes d'aménagement climatique abordés dans cette étude, notamment la gestion des sols (perméabilité, végétalisation, albédo) afin de limiter les effets thermiques localisés. La mise en place d'un suivi environnemental in situ, dès la phase préalable aux travaux, permettrait de disposer de données de référence pour évaluer l'évolution réelle du microclimat. Enfin, une approche progressive et adaptable, intégrant des retours d'expérience en cours de réalisation, renforcerait la résilience environnementale du projet à long terme.