

Figure 1: Coupe d'une simulation de vent.

Simulation haute résolution de la carte des pressions dynamiques en zones rurales et urbaines pour la Suisse

RAPPORT FINAL

U. Geinoz, N.Schroeter et R. Baltensperger | 27/01/2026

1. Contexte

En Suisse, les vents sont liés aux flux à grande échelle et sont fortement impactés par la topographie complexe du pays. Ils présentent donc des variations spatiales considérables (Figure 1).

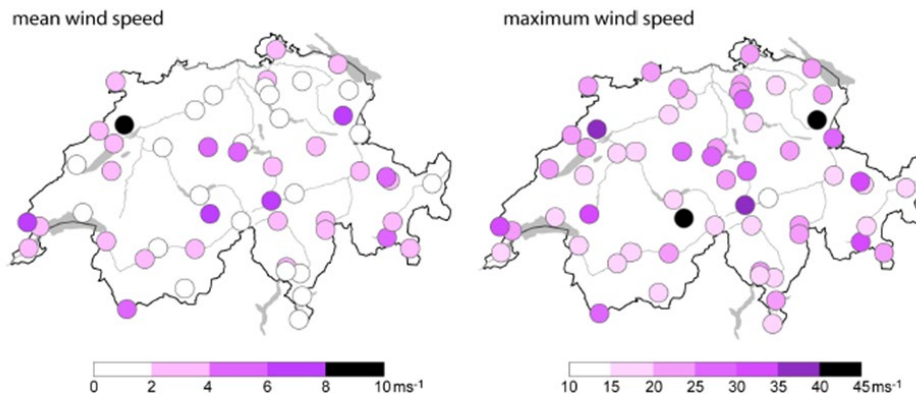


Figure 1 : gauche : vitesse moyenne des vents ; droite : vitesse maximale quotidienne mesurée. Valeurs issues de la base de données de MétéoSuisse (mesures de 1981 à 2010).

Les normes SIA 260ss régissent le dimensionnement des constructions nouvelles et les démarches de vérification structurelle du bâti existant. La SIA 261 spécifie, à l'aide d'une carte, les valeurs minimales des pressions dynamiques que les façades doivent supporter. La carte a été établie par une simulation numérique (maillage à 2 km) basée sur des mesures issues des stations du réseau ANETZ récoltées entre 1981 et 2000 environ.

2. Objectif

Le projet consiste à développer un outil informatique (qui sera délivré sous forme de fichier « zip ») fonctionnant sur Windows 11 qui simulera et présentera une carte des pressions dynamiques pour une région géographique en Suisse et une situation météorologique spécifique. L'utilisateur choisit librement la zone géographique, qu'il s'agisse d'une région rurale ou urbaine ainsi que les données météorologiques, qu'elles soient basées sur des prévisions ou sur des scénarios aérologiques hypothétiques (par exemple, une situation de tempête qui n'a pas encore eu lieu).

Dans un premier temps, l'outil recueillera automatiquement les données à partir de différentes sources de données en accès libre pour construire une simulation numérique. Ensuite, il effectuera un calcul détaillé de la situation aérologique et générera la carte des pressions dynamiques pour la région choisie. Les utilisateurs auront la possibilité d'identifier sur la carte les bâtiments ou les zones qui se trouvent à proximité des limites établies par la SIA. Voir la Figure 2 qui présente les différentes étapes de l'utilisation de l'outil.

Les paramètres de simulation (rugosité, grille utilisée pour les calculs...) s'adaptent en fonction de la grandeur de la zone sélectionnée par l'utilisateur. Dans le cas d'une zone urbaine, l'utilisateur pourra sélectionner une portion de la ville et l'outil calculera la situation aérologique avec un maillage (de l'ordre du mètre) adapté à la zone sélectionnée.

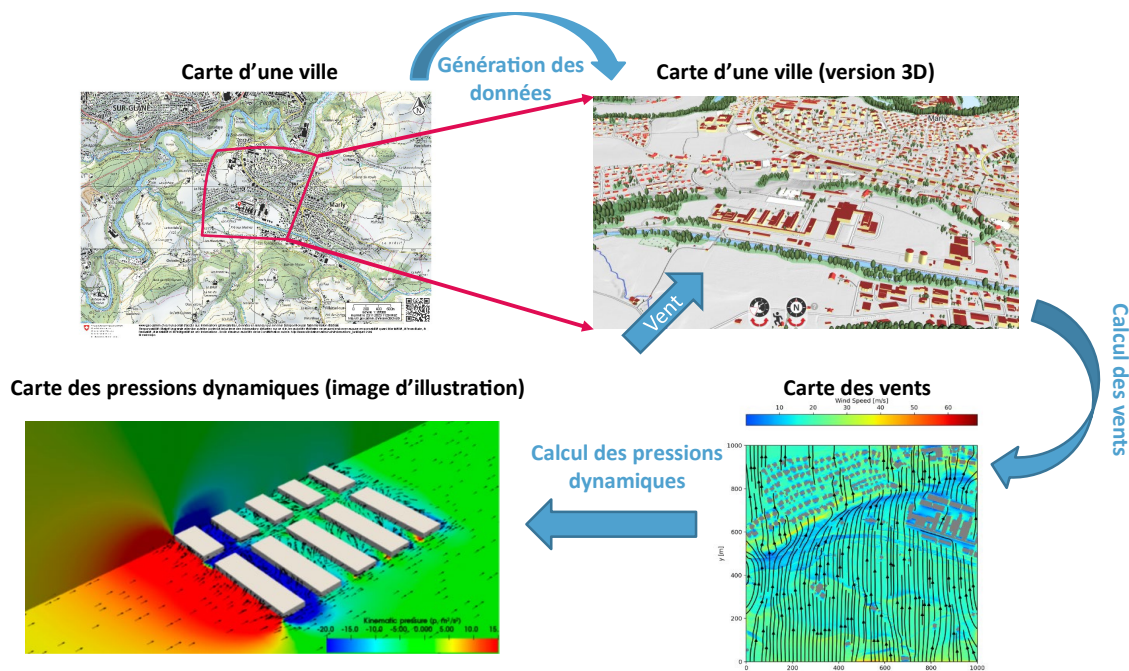


Figure 2 : Etapes de l'utilisation de l'outil (images du bas à gauche issue de l'article [1]).

3. Organisation

Le projet a été découpé en 5 Work Packages :

- WP1 : Administration (mois 1 à 18)
- WP2 : Choix d'un modèle mixte rural-urbain (mois 1 à 8)
- WP3 : Etude des données open data et développement d'une bibliothèque logicielle de génération automatique de données topographiques (mois 2 à 6)
- WP4 : Validation du modèle en situation tempêteuse (mois 4 à 10)
- WP5 : Développement d'une application desktop calculant les vents adaptés aux zones urbaines et rurales (mois 7 à 14)
- WP6 : L'application est complétée avec la visualisation des zones de pressions dynamiques et comparaison avec les valeurs SIA 261 (mois 10 à 18)

Un comité formé de représentants des établissements cantonaux d'assurance a accompagné le projet. Ce comité a participé à 6 séances et a pu constater de l'avancement du projet et des résultats des jalons. Lors de la séance du 7 avril 2025, date du jalon Go/No Go sur la validation du modèle en situation tempêteuse, il a été décidé de poursuivre le projet.

Ce comité a aussi participé activement à la validation de l'application développée. Des demandes pertinentes de fonctionnalité émises par le comité ont été intégrées dans le logiciel final.

L'avancement du projet a toujours été en parfaite adéquation avec la planification prévue dans la demande de subsides.

4. Faits marquants du projet

Nous résumons ici les faits marquants du projet dans les différents WP.

4.1. WP2 : Choix d'un modèle mixte rural-urbain (mois 1 à 8)

Etant donné que la solution WN (WindNinja) a un maillage plus fin (proche du sol) que QW (QES-Winds) dans les zones rurales, nous avons décidé de conserver cette solution dans l'outil développé. Ainsi, l'utilisateur pourra

1. Utiliser WN pour l'aspect rural et QW pour la partie urbaine.
2. Utiliser uniquement QW dans les deux cas.

Voir la Figure 2 pour une illustration des solutions choisies.

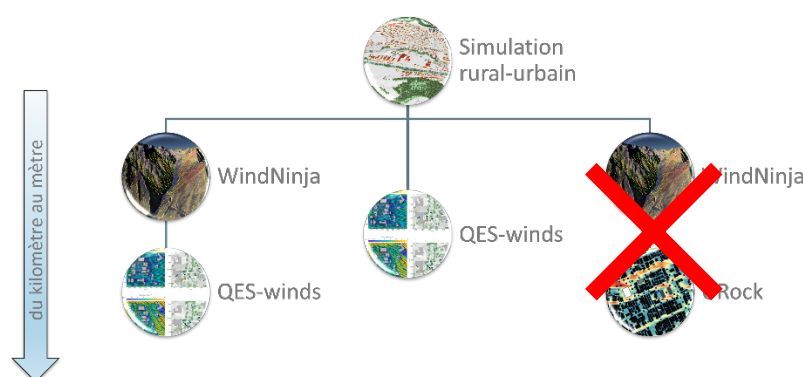


Figure 3: Solutions choisies.

4.2. WP4 : Validation du modèle en situation tempêteuse (mois 4 à 10)

Nous nous permettons ici de reprendre en partie les conclusions du rapport intermédiaire.

Bien que les solutions QW et WN ne sont pas les meilleures solutions possibles, elles permettent de réaliser des simulations sur des domaines relativement grands sans nécessiter trop de calculs. Nous nous permettons ici de reprendre les conclusions de l'article de Neophytou, Gowardhan et Brown de 2011 (An inter-comparison of three urban wind models using Oklahoma City Joint Urban 2003 wind field measurements). Il est important de considérer qu'étant donné la variabilité et les incertitudes du domaine et du champ éolien, le niveau des différences quantitatives dans les erreurs calculées ne permet pas d'affirmer une performance clairement supérieure d'un modèle (QW, RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) ou LES (Large Eddy Simulations) par rapport aux autres. Cependant, il est intéressant de noter que le modèle le plus simple (de type QW) semble fonctionner presque aussi bien que les modèles plus exigeants en termes de calcul.

Notons enfin que l'outil d'extraction des données qui a été développé permet de changer de manière assez rapide le moteur de calcul. Si les solutions QW ou WN s'avèrent être trop imprécises, il est toujours possible de les remplacer dans le futur par d'autres solutions (de type RANS-CFD, LES-CFD ou autre) qui donnent sans doute des résultats plus proches de la

réalité. Précisons enfin que bien modéliser des vents en zones urbaines ou rurales fait toujours l'objet de recherches récentes, voir l'article de Tominaga, Wang, Zhai et Stathopoulos de 2023 (Accuracy of CFD simulations in urban aerodynamics and microclimate: Progress and challenges) par exemple. Il est important de noter que les phénomènes environnementaux urbains présentent de nombreuses sources d'incertitude. Bien qu'une grande précision soit toujours privilégiée, des exigences excessivement élevées peuvent être injustifiées.

Pour ce qui est des situations tempêteuses, étant donné que les solutions QW et WN préservent la masse et sont donc linéaires, on peut s'attendre à ce que des simulations avec des vents tempêteux ne diffèrent des simulations avec des vents relativement faibles que par un facteur multiplicatif. C'est ce qui a été démontré dans le rapport intermédiaire.

4.3. WP3, WP5 et WP6 : développement de l'application

Nos objectifs tout au long du développement : « Simple d'utilisation », « Performance » et « Professionnel ». Voici quelques éléments clés de ce qui a été réalisé :

- L'application est articulée autour de projets. L'utilisateur choisit facilement et sur une carte 2D les zones rurales et urbaines à modéliser partout en Suisse. Il peut positionner à sa guise et paramétrer les stations de vents ainsi que la rugosité. Le logiciel dispose d'une base de données des vitesses limites et direction des vents dominants en tout point de la Suisse. Nous avons utilisé la carte des dangers relatifs aux tempêtes avec périodes de retour de 50 ans.
(<https://www.bafu.admin.ch/fr/cartes-des-dangers-relatifs-aux-tempetes>)
- L'utilisateur dispose d'une vue 3D de la zone analysée, il peut se balader à sa guise dans la scène et observer les vents et les pressions dynamiques sous différentes vues pertinentes.
- Un mode d'emploi complet et illustré fait partie intégrante de l'application.
- L'application contient des mécanismes de qualité professionnelle :
 - Des fichiers logs sont produits et ils permettent en cas de problèmes de plus facilement localiser les bugs
 - Une utilisation optimale des ressources CPU et RAM a été mise en place
 - Les algorithmes sont optimisés pour des calculs rapides et une visualisation fluide et agréable
 - Une présentation multilingue : allemand, français, italien et anglais
 - Des préférences pour faciliter l'utilisation
 - Une application d'installation pour aider au déploiement
 - Une architecture extensible qui permet d'ajouter des nouveaux moteurs de modélisation/calculs aisément
 - Une gestion par mémoire cache des données téléchargées pour éviter de multiples transferts

4.4. WP6 : validation par des experts

La présente étude évalue la précision et la robustesse du logiciel DyP-Sim, développé dans le cadre du projet « Simulation haute résolution de la carte des pressions dynamiques en zones rurales et urbaines pour la Suisse », dédié à la simulation tridimensionnelle de la pression dynamique du vent sur les bâtiments dans différents contextes territoriaux en Suisse.

L'objectif est de comparer les résultats obtenus avec DyP-Sim aux valeurs de référence prescrites par la norme SIA 261, tout en analysant la sensibilité des résultats à divers paramètres physiques et numériques.

4.4.1. Méthodologie

Quatre cas représentatifs ont été analysés :

1. Bâtiment isolé en zone rurale (plateau)
2. Bâtiment semi-isolé en zone alpine
3. Bâtiment urbain ordinaire
4. Quartiers urbains complexes (Fribourg, Berne, Zurich)

Les éléments suivants ont été étudiés :

- Taille du maillage urbain et rural,
- Taille et position des zones rurales et urbaines,
- Direction, intensité du vent ainsi que rugosité du sol,
- Présence de bâtiments voisins, avec comparaison directe entre les résultats simulés et calculés selon la norme SIA 261.

4.4.2. Principaux résultats

- Les pressions et les suctions simulées diffèrent en moyenne de 10 à 20 % des valeurs normatives dans les cas simples, avec une bonne cohérence qualitative dans la distribution des contraintes (maximums sur les façades et les toits exposés au vent).
- L'influence du maillage est importante : un maillage plus fin augmente la précision mais aussi le temps de calcul ; au-delà de certaines limites, un maillage grossier rend les résultats inutilisables.
- La taille et la position des zones de calcul (urbaines/rurales) influencent significativement la pression résultante.
- Dans les contextes alpins, les différences entre la simulation et la norme sont plus prononcées (jusqu'à 50 %), probablement en raison de la complexité morphologique et de la sensibilité à la rugosité du sol.
- Dans les quartiers urbains, DyP-Sim montre un potentiel dans la représentation des effets locaux du vent (zones d'ombre, barrières, accélérations entre les bâtiments) avec des pressions jusqu'à 60-70% plus élevées que les valeurs normatives, suggérant que la norme peut sous-estimer les effets dynamiques réels dans les zones urbaines.

4.4.3. Limites

- Absence de résultats avec un maillage trop important
- Pénétration des « tubes de vent » dans les volumes de construction, lié uniquement à un problème d’affichage

4.4.4. Améliorations

- Différencier la pression et la succion
- Bâtiment de simulation
- Ajout de nouveaux bâtiments
- Détails de visualisation et insertion des données

4.4.5. Conclusion

DyP-Sim se révèle être un outil prometteur pour l’analyse qualitative et quantitative de la pression du vent, mais il nécessite encore des optimisations concernant la gestion du maillage, la définition des zones. L’application fournit des résultats cohérents avec la norme SIA 261 pour des bâtiments simples et propose une approche réaliste dans les environnements urbains complexes, mettant ainsi en évidence les limites potentielles des formulations normatives traditionnelles dans la représentation de la variabilité locale du vent.

Mylène Devaud et Enea Ceppi

5. Utilité pour les établissements cantonaux d’assurance

D’un point de vue pratique pour les établissements cantonaux d’assurance, suite à une simulation, il est possible de

- visualiser le vent par couche (voir la Figure 4);

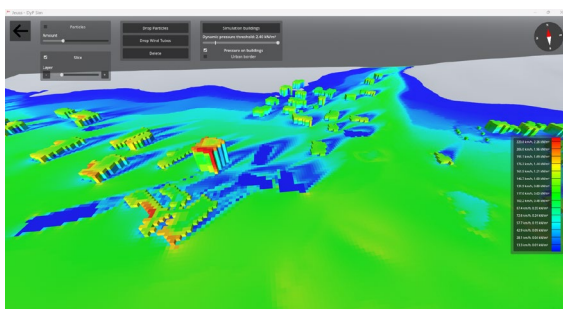


Figure 4: Visualisation du vent par couche.

- voir l’écoulement du vent autour des bâtiments (Figure 5);

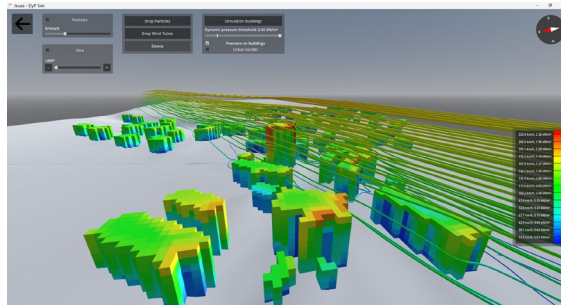


Figure 5: Visualisation de l'écoulement du vent autour des bâtiments.

- déterminer facilement les bâtiments où la pression dynamique est élevée (code couleur).

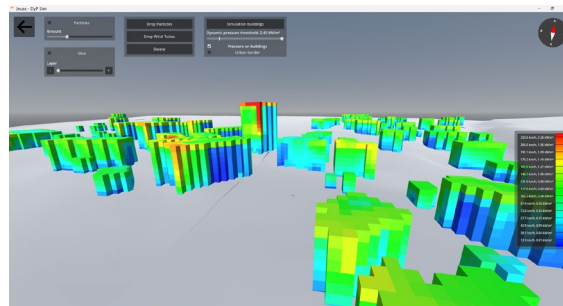


Figure 6: Visualisation de la pression dynamique sur les bâtiments.

6. Conclusion générale et perspectives

Suite aux différents retours obtenus (retours de la commission et du WP6), nous pouvons affirmer que le résultat final obtenu dépasse les objectifs décrits dans la demande de subsides.

Voici une liste de « faiblesses » de l'application :

- La forme des bâtiments lors des simulations correspond à des parallélépipèdes, les toits étant plats. Ceci a un impact sur la précision de la pression dynamique calculée.
- Le logiciel est dépendant de la qualité des données de Swisstopo et de leur fréquence de mise à jour.
- Les modélisations sont limitées à une résolution à 1m. On peut certainement atteindre 0.5m voire mieux.
- Dans l'idéal la zone de simulation devrait couvrir une ville entière pour bien tenir compte des interactions entre les bâtiments et avec une résolution adéquate. Ainsi cela nécessite donc beaucoup de mémoire et de la patience pour obtenir les résultats.
- Il manque la possibilité d'ajouter ou d'enlever des bâtiments pour simuler des situations liées au changement du bâti.

Voici une liste de propositions d'amélioration de l'application :

- Il n'est pas toujours aisé de se repérer dans la scène 3D. L'affichage des adresses des bâtiments permettrait de faciliter le travail de l'utilisateur.

- Il manque une fonctionnalité qui permet une analyse de tous les bâtiments assurés. Le fait de traiter manuellement prend beaucoup de temps et de ressources. L'idée serait de déterminer automatiquement tous les endroits où la pression dynamique calculée dépasse un certain seuil.
- Selon les résultats des comparaisons de QW avec des résolutions différentes, on pourrait évoquer le fait d'intégrer un modèle Large Eddy Simulation basé sur les équations de Navier-Stokes qui permettrait de modéliser plus précisément les bâtiments et de disposer d'une valeur plus précise de la pression. Les désavantages de cette solution sont de devoir disposer d'un gros serveur avec beaucoup de ressources et les temps de calcul sont très longs.
- Proposer une solution serveur pour des calculs à plus grande échelle.

7. Annexes

1. Rapport intermédiaire
2. Rapport complet des experts
3. Mode d'emploi
4. Ppt des séances