

ÉVALUATION AVANT CONSTRUCTION DE L'IMPACT D'UN OUVRAGE LINÉAIRE EN REMBLAI SUR LE RISQUE DE GEL PRINTANIER : EXEMPLES SUR LA LGV EST-EUROPÉENNE DANS LE VIGNOBLE DE CHAMPAGNE

G. BELTRANDO¹, H. QUENOL^{1,2}, S. BRIDIER^{1,3}, M. MADELIN^{1,4}

¹ Université Denis Diderot, UMR 8586 du CNRS (PRODIG)

2 place Jussieu 75251 Paris Cedex 05 beltrando@paris7.jussieu.fr

² Laboratoire COSTEL, UMR6554 du CNRS (LETG), Université Rennes 2
place du recteur Henri le Moal, 35043 Rennes Cedex.

³ Université de Provence UMR 6012

29 av. Robert Schuman 13621 Aix-en-Provence Cedex

⁴ Université de Bourgogne, Centre de Recherches de Climatologie (UMR CNRS 5210),
6 boulevard Gabriel 21000 Dijon.

Résumé

Afin d'évaluer dans un vignoble l'incidence sur la fréquence du gel dommageable ($t^{\circ} < -2^{\circ}\text{C}$) que pourrait créer un futur remblai de la Ligne à Grande Vitesse Est européenne, une bâche ayant la longueur et la hauteur de cet ouvrage a été installée sur le site des Fonds de Sillery (sud-est de la ville de Reims). Pour les situations météorologiques de type radiatif, des mesures de la température et des écoulements d'air froid, ont été effectuées, durant le printemps 2001, sur 19 points implantés en amont du futur remblai, simulé par une bâche. La comparaison des résultats sans bâche (2 nuits de mesure), puis avec sa présence (3 nuits), montre que cet ouvrage permettra la formation d'un lac d'air froid en amont du remblai, mais que celui-ci ne devrait pas affecter le vignoble. Sur un autre site, à Vrigny (sud-ouest de Reims), d'autres mesures de températures réalisées avec et sans bâche ont permis de repérer les talwegs d'écoulement. En tenant compte des résultats enregistrés sur le premier site ainsi que de la hauteur de l'ouvrage, une simulation spatiale a été réalisée. Elle montre que quelques hectares de vigne seraient affectés par un refroidissement supplémentaire dû à la présence des murs antibruit de la future ligne. Sur les deux sites, ces résultats ont nécessité des aménagements spécifiques afin de laisser circuler l'air froid pour qu'il n'affecte pas le vignoble.

Mots-clés : risque gélif, talus ferroviaire, Ligne TGV Est européenne, vignoble de Champagne, climatologie appliquée

Abstract

Evaluation before construction of the impact of a linear embankment on the spring frost risk : application to the European East LGV line in the Champagne vineyard

The new east european *Ligne à Grande Vitesse* LGV (Paris-Strasbourg) is going to cross a part of the Champagne vineyard located in the northern region of the *Montagne de Reims*. For radiative meteorological situations (clear sky, cool wind), the spatial

variability of night temperatures can sometimes be very important, in particular due to cold air gravity flows towards low altitude zones. Thus, every obstacle, such as the embankment, can trap the cold air and induce an accumulation of cold air upstream. The aim of this paper is to show the results of climatological researches at the local scale on two particular sites in the vineyard, the *Fonds de Sillery* and *Vrigny*. In this work, we tried to evaluate the effect on cold wind accumulation and on the frequency of detrimental freezing of the future railway embankment.

Firstly, in the *Fonds de Sillery* site (South-East of Reims), a canvas cover with the characteristics of this embankment was installed at the location of the future line. For nights with radiative conditions, measurements of actinothermic index temperatures and of cold air winds, were done in spring 2001, on 19 points upstream the future embankment, simulated by the canvas cover. Moreover, we also used a DEM built in order to take into account the effect of the topography. The comparison between the results without the canvas (2 nights) and those with the canvas (3 nights) shows that the lake of cold air created by the future line does not affect the vineyard.

On another site, at *Vrigny* (west of Reims), the LGV line will also cross the vineyard. Thus the vinemakers were worried about the future embankment and especially about the noiseless wall supposed to protect the habitations. New temperature measurements were done *in situ*, but without canvas. They allowed us to identify the flow talwegs. A simulation was also done taking into account the topography around the cold wind lake induced by the embankment. It shows that few vineyard hectares would be affected by an increased cooling due to the future noiseless wall. This result was taken into account and new specific installations (change of the shape of noiseless walls, holes in the embankment) will be added in order to let the cold air circulate so that it does not affect the vineyard.

This empirical approach allowed us to precise the nature and intensity of cold air flows on two famous vineyard sites and to extrapolate the possible effect of a future embankment which would inevitably change the cold air circulation during meteorological situations with a strong nocturnal radiative cooling. Even if the duration of the study is short (few measurement dates), this approach allowed us to validate several assumptions and to propose specific installations in order to reduce the perturbations induced by the new line.

Keywords: frost risk, railway embankment, High Speed Line (East TGV), Champagne vineyard, climatology applications.

1. Problématique et contexte de l'étude

Lorsque la situation météorologique d'une nuit est caractérisée par un ciel clair ou peu nuageux, le bilan énergétique du substrat est plus fortement négatif que pour les situations de ciel couvert. Dans ce cas là, la température du substrat et de l'air sus-jacent sont relativement froides et lorsque le vent est nul ou faible (< 3 m/s environ) et que la surface est en pente, cet air froid s'écoule dans les parties les plus basses. Cette situation, appelée « radiative » (ciel clair ou peu nuageux, vent faible ou nul) est favorable à un fort refroidissement nocturne dans la couche limite. Elle se manifeste par une assez grande variabilité spatiale

des températures, qui, près de la surface sont d'autant plus faibles que l'air stagne ou s'écoule lentement (Yoshino, 1975; Marth, 1986; Kang & al., 1998...). De temps à autre, au printemps, ces situations météorologiques peuvent être à l'origine de dégâts localisés dans l'espace qui affectent en particulier la viticulture. Depuis longtemps les viticulteurs connaissent ce phénomène et les secteurs les plus vulnérables ne sont généralement pas plantés en vigne. Cependant, certains espaces sensibles sont dans l'aire d'appellation d'origine contrôlée (AOC) dont les limites dépendent de nombreux autres facteurs dont certains n'ont pas grand chose à voir avec le milieu physique.... Les viticulteurs peuvent alors prendre des précautions (taille tardive de la vigne pour que la reprise se fasse après la période à risque, lutte antigel par chaufferette ou aspersion d'eau...) sur les parcelles où ils estiment que ces aléas peuvent avoir des conséquences préjudiciables pour leur compte d'exploitation.

En modifiant les caractéristiques de la surface (rugosité, nature), le remblai d'un ouvrage de transport (voie ferrée, route...), perturbe la circulation de l'air froid près de la surface et crée un lac d'air froid qui peut être à l'origine de dégâts supplémentaires sur des cultures sensibles au gel. C'est ce qui pourra se produire en amont des remblais de la Ligne à Grande Vitesse (LGV) Est européenne (Paris à Strasbourg) qui traverse le vignoble de Champagne en contrebas des coteaux de la Montagne de Reims (figure 1).

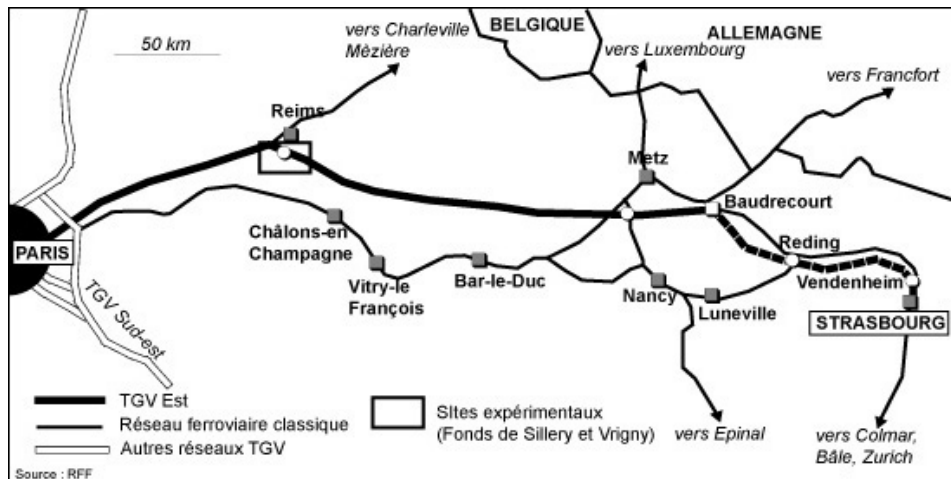


Figure 1 : Tracé de la Ligne à Grande Vitesse Est européenne et la région d'étude. *Position of the European Eastline LGV and the area of study*

Au printemps, lors de la reprise de l'activité végétative, lorsque le bouton floral apparaît, des températures inférieures à -2°C sont suffisantes pour abaisser la température de surface de la plante en dessous de son seuil de sensibilité, ce qui provoque la destruction des *bourgeons primaires*. Ensuite, la plante reste très fragile pendant plusieurs jours : au stade de *pointe verte*, lorsque la température est inférieure à -2°C environ, le bourgeon est altéré

(Huglin, 1986). Dans le vignoble de Champagne, où les exploitations sont majoritairement de taille réduite, quelques hectares de vignes ainsi détruites peuvent s'avérer catastrophiques sur le plan économique pour de nombreux viticulteurs. Pendant longtemps, ce type d'impact a peu interpellé les riverains et les maîtres d'ouvrage, probablement parce que l'aire d'influence sur le climat de ces obstacles artificiels est très localisée et qu'ils engendrent des pertes économiques pour une minorité d'agriculteurs, mais aussi parce que au-delà du constat, il n'est pas aisé d'en préciser l'importance avec des critères scientifiquement irréfutables.

Dans ces grandes lignes, le tracé de la LGV Est européenne a été fixé, par la SNCF, au début des années 1990. Dans l'Avant-Projet Sommaire (APS), le remblai initialement prévu aurait atteint plus de 5m de haut sur certains secteurs du vignoble, et notamment dans les Fonds de Sillery (sud-est de Reims), site de la première étude présentée ici. Pour évaluer les conséquences que pourrait avoir ce remblai sur l'accumulation d'air froid, nous avons réalisé en quelques semaines durant le printemps 1995 (bien avant les premiers travaux de terrassement), une première étude, qui s'est appuyée sur des mesures de la température et des écoulements de l'air dans les 5 premiers mètres au-dessus de la surface (Beltrando & *al.*, 1995). Les résultats ont confirmé les hypothèses d'un refroidissement supplémentaire, évalué à environ 2°C, pour les situations favorables à un fort refroidissement nocturne. Ils ont aussi montré que le remblai prévu dans l'APS aurait pu amplifier l'aléa gel, à plusieurs centaines de mètres de la LGV et affecter de la sorte une dizaine d'hectares du vignoble, car l'air froid s'accumule en formant un plan légèrement incliné vers le haut de la pente, lorsqu'un vent faible souffle en direction du coteau (Bridier & *al.*, 1995). L'Etat s'est engagé à tenir compte de ces résultats et lorsque le projet a été relancé à la fin des années 1990, Réseau Ferré de France [RFF, établissement public créé le 13/02/97 pour aménager et développer le réseau ferroviaire à la place de la SNCF] a demandé au *Groupement Tractebel Development Engineering – Coyne et Bellier* (TDE-COB) de prévoir des aménagements, dans l'Avant-Projet Définitif (APD) afin de réduire sensiblement ce risque supplémentaire. Sur le site des Fonds de Sillery, avec la collaboration du groupement TDE-COB, nous avons proposé trois types d'aménagements qui ont été réalisés par le Maître d'oeuvre :

- 1) une modification du rayon de courbure pour réduire l'emprise dans le vignoble sans que la LGV ne s'approche des habitations du hameau de Puisieux au nord de la LGV... (cf. Fig. 2) ;
- 2) un remodelage du terrain dans la partie en creux, par l'apport de 60 000m³ de terre sur 11ha en amont du remblai afin de diminuer le volume du lac d'air froid retenu par le remblai ;
- 3) un abaissement de la hauteur du remblai d'environ 2 m et par conséquent de sa longueur qui passe de 780 m à 480 m.

Dans les conclusions de cette première étude réalisée en 1995, nous avons aussi demandé l'installation d'une station météorologique automatique, implantée en bord de vignoble, à environ 600 m de la future LGV. Les données de cette station - dont la maintenance est assurée par le Comité Interprofessionnel du Vin de Champagne (CIVC) à Epernay - sont archivées dans le but de pouvoir comparer les températures qui y sont mesurées à celles d'autres stations du vignoble (Beltrando, 1998) et de rechercher une éventuelle différence de comportement thermique entre ces stations, avant et après la construction du remblai de la LGV.

Le premier objectif de cet article est d'évaluer, avant la construction du remblai, l'éventuel risque résiduel pouvant persister sur ce site, après les propositions d'aménagement évoquées ci-dessus, afin d'en envisager d'autres, le cas échéant ou de proposer des mesures compensatoires que les viticulteurs et leurs représentants auront à négocier. Les résultats qui ont pu être tirés de cette première étude ont ensuite été réemployés pour d'autres secteurs du vignoble. Le cas du site de Vrigny, au sud-ouest de l'agglomération de Reims, est présenté ici.

2. Méthodologie et données utilisées

2.1 Le choix d'une méthode basée sur l'observation in situ

Pour tenter d'apporter des éléments de réponse à la question posée, on peut envisager trois catégories de méthodes :

- La modélisation « physique » : elle est obtenue en construisant une maquette de l'espace étudié et une soufflerie pour simuler les mouvements de l'atmosphère, ainsi qu'un système permettant de réchauffer ou de réfrigérer la surface (Perrier, 1996). Ce type de démarche apporte des informations en trois dimensions sur le comportement de la couche limite. Mais l'expérimentation est très onéreuse, car il faut modéliser une région relativement grande avec une bonne précision (prise en compte de tout le coteau pour avoir une information sur les écoulements, prise en compte des aspérités de la surface tels les rangées d'arbres, les talus...) pour se rapprocher des paramètres du terrain. En revanche, ce type de modèle permet de simuler divers types de temps sans avoir besoin de les observer toutes sur le site. Cependant, il est prudent de valider le modèle par des observations de terrain, car il est bien difficile de se rapprocher de la réalité avec une maquette de quelques mètres de coté.

- La modélisation « numérique » : elle est surtout utilisée pour des échelles spatiales de niveau supérieur afin d'évaluer le comportement des variables météorologiques (champs de vent, de température, d'humidité...). Ce type d'approche qui, aux échelles fines, a beaucoup progressé depuis une vingtaine d'années (Hertig, 1986, Wanner, 1991), mais ne semble par encore apte à modéliser, avec suffisamment de réalisme, des processus d'échelle spatiale fine. Cela s'explique par le fait qu'il faut prendre en compte, aux échelles fines, de

nombreux paramètres tels la nature du substrat, l'humidité du sol, de l'air ou l'état de la végétation. Cependant, les études récentes sur la modélisation des brises catabatiques à l'échelle locale constituera probablement une voie d'avenir pour ce type de problématique.

- La modélisation « empirique » : elle consiste à simuler l'obstacle à l'écoulement de l'air (ici par une bâche) et à mesurer les variables atmosphériques (température, écoulement de l'air froid...) sans puis avec la présence de l'ouvrage, afin d'établir un différentiel entre les deux. Cette démarche demande un certain nombre de nuits de mesures sur le terrain lors de situations météorologiques favorables au gel radiatif (un type de temps supposé intéressant peut ne pas se produire pendant plusieurs années...). Pour avoir des mesures qui soient significatives, il faut au minimum deux ou trois nuits sans puis avec la présence de la bâche. Comme pour les méthodes précédentes, la méthode reste fragile, car l'on sait très bien que d'une nuit à l'autre, la situation n'est jamais rigoureusement identique (influence des vents faibles qui déplacent l'air froid, de la vapeur d'eau dans l'air qui modifie le rayonnement atmosphérique, de l'humidité du substrat...). C'est cette dernière démarche qui a été adoptée ici pour le site des Fonds de Sillery.

2.2 Le site des Fonds de Sillery

La première aire d'étude, est localisée à environ 10 km au sud-est de la Ville de Reims, dans le bas du versant nord de la Montagne de Reims, sur le site des « Fonds de Sillery », où la LVG doit passer au pied du coteau viticole (figure 2). Dans le bas de ce coteau, les pentes sont faibles (autour de 2°) et, pour les situations radiatives, la configuration topographique générale favorise l'accélération de l'écoulement de l'air dans le haut du coteau (pente > 7°) et son ralentissement dans la partie basse, où l'air s'écoule, tout naturellement, hors du vignoble, vers la vallée de la Vesle, au nord est (figure 3).

Sur le site des Fonds de Sillery, un Modèle Numérique de Terrain (MNT) a été construit à partir d'un grand nombre de relevés altimétriques réalisés pour le compte du groupement TDE-COB (5635 points cotés répartis régulièrement sur une surface de 90 ha). L'interpolation des valeurs a permis la réalisation d'une carte sur laquelle l'équidistance des isohypses est de 50 cm et la résolution verticale estimée à 10 cm. Ce MNT est utilisé pour calculer une pente en degrés pour des pixels de 25 m de coté (Fig. 4). La finesse de ces données par rapport à la BD alti permet de repérer certains détails de la topographie, en particulier les micros talwegs qui doivent drainer l'air froid superficiel vers la dépression centrale des Fonds de Sillery, qui n'est pas occupée par la vigne. Sur ce site, il n'y a pas, avant les travaux de la LVG, d'aspérité d'origine anthropique dont la hauteur est supérieure à 30 cm (les plus hautes aspérités sont les talus des ruisseaux de drainage).



Figure 2 : Occupation du sol au sud-est de Reims (« BD carto » de l’Institut Géographique National - IGN), site des Fonds de Sillery et emplacement de la LGV. *Land use in the south-east of Reims (« BD carto » Institut Géographique National - IGN), in the Fonds de Sillery and position of the LGV.*

2.3 La simulation du remblai dans les Fonds de Sillery et les observations de terrain

Afin d’avoir un ordre de grandeur du différentiel thermique entre l’état initial (avant tout travaux de terrassement) et l’état final (avec remblai et ballast), une bêche supportée par un ensemble de poteaux a été installée. Cette bêche a la longueur et la hauteur exacte de l’ouvrage prévu par le groupement TDE-COB (longueur 480 m, hauteur variant de 50 cm à 3 m). Ces dimensions tiennent compte d’une part du remodelage de terrain prévu, d’autre part de l’épaisseur du ballast et des rails (figure 5). Fixée à la surface, cette bêche peut être installée en 1 heure environ par deux personnes. Les nuits de mesure, cette opération est effectuée en fin d’après midi.

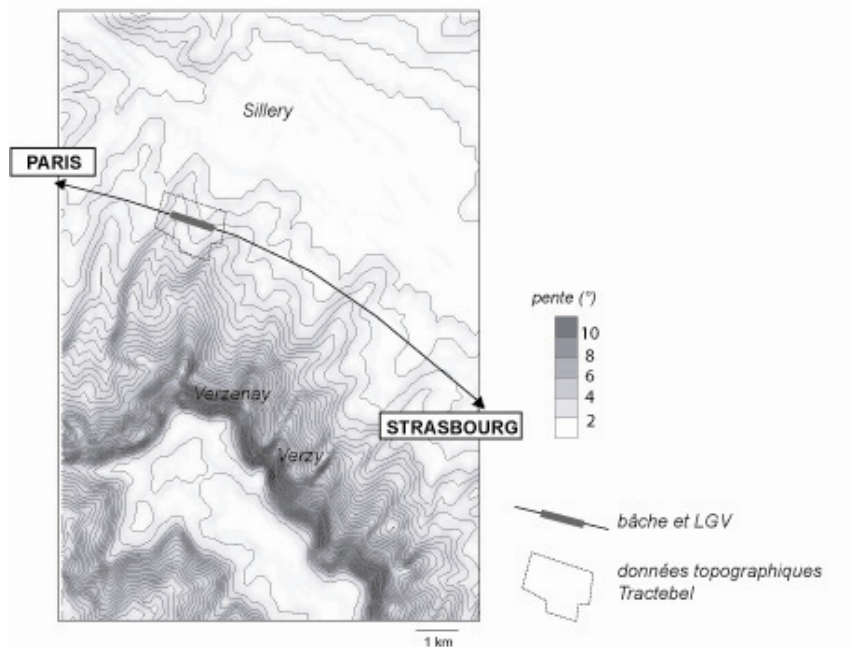


Figure 3 : Topographie de la région d'étude obtenue à partir de la « BD alti » de l'IGN et emplacement de la LGV dans le bas du coteau nord de la Montagne de Reims. *Topography of the study area obtained from the "data base alti" of the IGN and position of the LGV in the bottom of the northern slope of the Montagne de Reims.*

Pour évaluer les températures à la hauteur des bourgeons de la vigne (environ 50 cm au-dessus de la surface), 21 thermomètres enregistreurs (type TinyTalk) ont été répartis sur le site (figure 6). Etalonnés par inter-comparaison, ces capteurs sont utilisés sans abri, les valeurs ne sont donc utilisables que la nuit (le jour, le rayonnement solaire réchauffe le capteur) : ils fournissent ce que l'on appelle une température en indice actinothermique (IA) qui est la température considérée comme la plus proche possible de celle subit par la surface des végétaux. Les mesures sont enregistrées en continu, puis des moyennes sur des pas de temps définis sont calculées ensuite.

En parallèle, les données enregistrées dans la station météorologique automatique, installée en 1998 pour les besoins de cette étude, ont été analysées (cf. plus haut). Cette station, appelée « Verzenay TGV », est de même type que les 33 autres installées dans le vignoble par le CIVC et Météo-France (type ENERCO). Seules les données de température en IA et de vent à 2 m ont été utilisées pour les besoins de l'étude. Pour les écoulements d'air de faible vitesse, une girouette en balsa (poids de la partie mobile 1,5 g) a été employée. Associé à une boussole, elle permet d'obtenir la direction des écoulements par des mesures itinérantes réalisées durant toute la nuit par un opérateur. Des fumi-

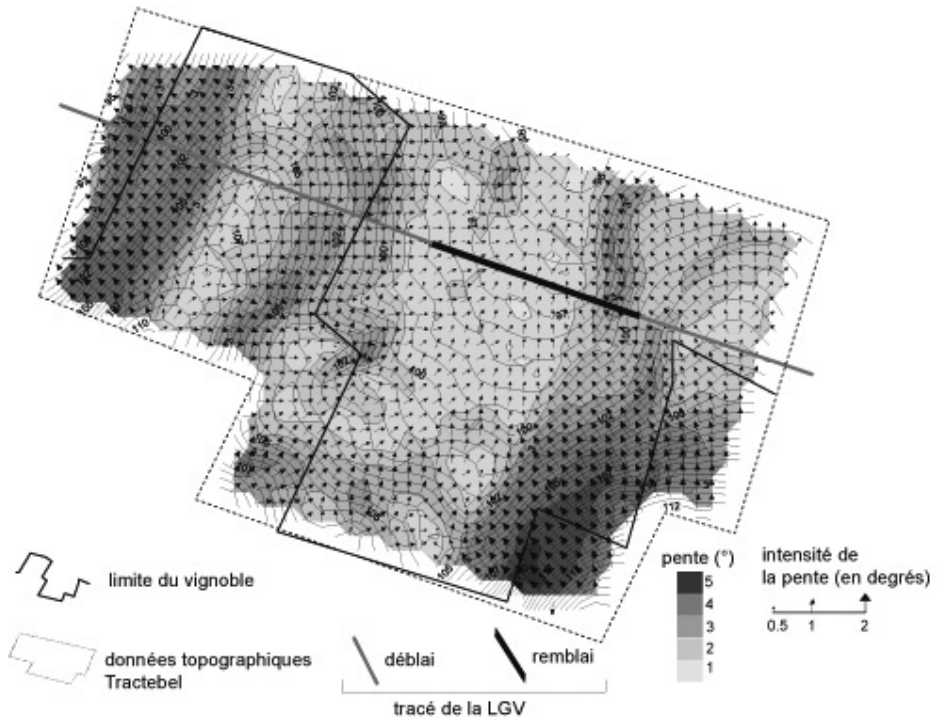


Figure 4 : Topographie des Fonds de Sillery représentée sur un Modèle Numérique de terrain construit à partir de 5635 relevés altimétriques réalisés pour le groupement TDE-COB. *Topography of the Fonds de Sillery represented on a DEM built from 5635 raised altimetric realized for the grouping TDE-COB*



Figure 5 : Vue de la bâche dans les Fonds de Sillery. *View of the canvas cover in the Fonds de Sillery.*

gènes ont également été utilisés (produits destinés aux professionnels du spectacle), ils produisent une épaisse fumée blanche dont l'observation, par photographie, renseigne sur la trajectoire des écoulements superficiels de l'air.

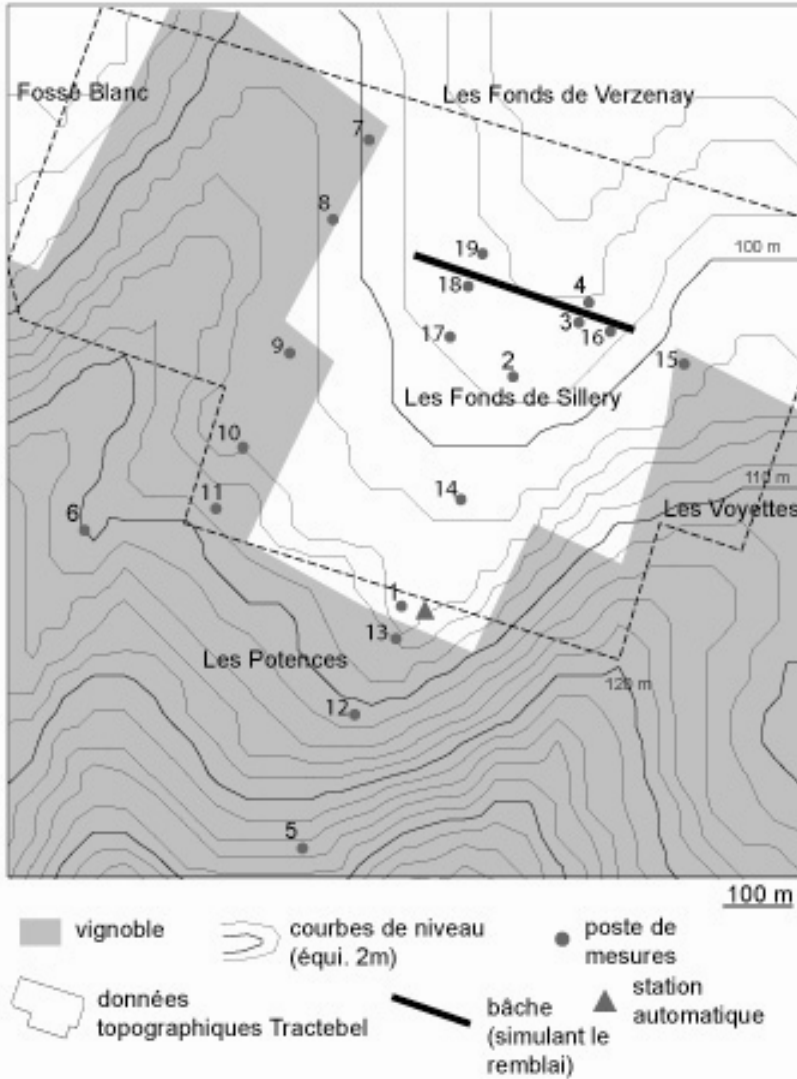


Figure 6 : Emplacement des capteurs de mesure temporaires et de la station automatique fixe ainsi que de la bâche simulant le remblai sur le site des Fonds de Sillery. *Site of the temporary transmitters and the automatic station as well as cover simulating the embankment on the site of Fonds de Sillery.*

Les mesures se sont déroulées pour les nuits où la prévision à court terme donnait un temps de type radiatif. La décision était prise tous les soirs à 17 h, après consultation des prévisions spécifiques pour le vignoble diffusées par Météo-France Marne. Cinq nuits du printemps 2001, ont finalement été exploitables (nuit claire en calme avec températures nocturnes froides aussi bien dans la prévision que l'observation), dont deux sans la présence de la bâche (31/03 au 01/04 et 02 au 03/04) et trois avec (21 au 22/04, 23 au 24/04 et 03 au 04/06). La comparaison des températures de ce printemps par rapport à la normale 1971-2000, montre qu'en 2001, les températures ont été, en moyenne, 1,3°C au-dessus de la normale. Seules quelques matinées entre le 12 et le 25 avril 2001 ont enregistré des valeurs négatives à 2m sous abri (Beltrando & al., 2002). Le printemps 2001 peut donc être classé comme étant légèrement plus chaud que la moyenne de la région.

2.4 Le site de Vrigny et les observations de terrain

Le deuxième site d'étude est localisé à l'ouest de la ville de Reims (Fig. 7). A nouveau, la LGV traversera le vignoble et, au-delà de l'emprise directe dans le vignoble (bande de 70 m de large), le remblai et surtout le mur antibruit prévu pour protéger quelques habitations sur la commune de Vrigny au sud de la ligne ont inquiété les viticulteurs.

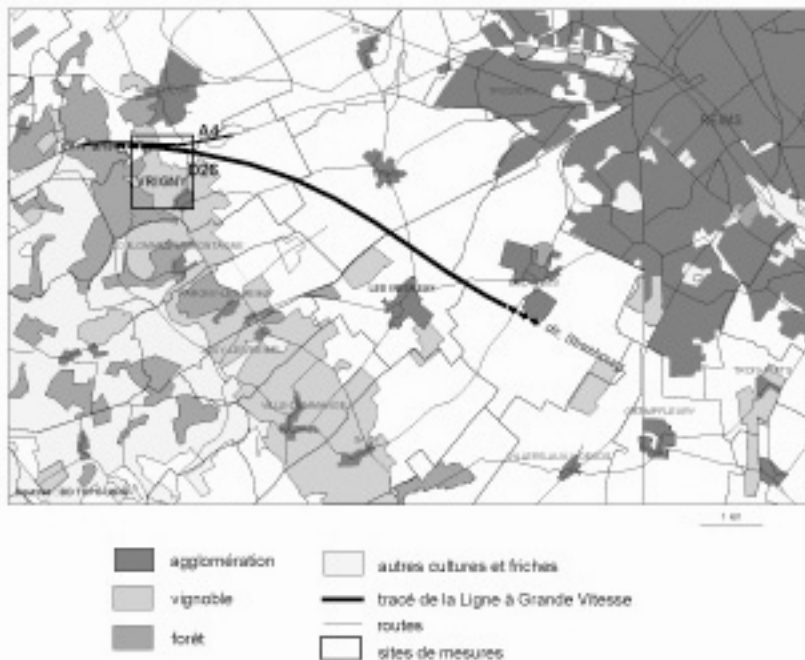


Figure 7 : Occupation du sol à l'ouest de Reims (BD carto de l'IGN), site de Vrigny et Ligne à Grande Vitesse. *Occupation of the ground in the west of Reims (BD carto of the IGN), site of Vrigny and LGV.*

Le vignoble est implanté jusque dans le bas du coteau (altitude autour de 105 m), où la pente est d'environ 3° alors qu'elle avoisine 10° dans le haut du coteau (figure 8). Comme pour le site des Fonds de Sillery, la topographie générale favorise l'accélération de l'écoulement de l'air superficiel dans le haut du coteau (non montré) et son ralentissement dans la partie basse qui est sub-horizontale (pente < 2°). A nouveau, la présence du remblai ferroviaire surmonté ici d'un mur antibruit, plus haut que celui déjà en place en bordure de l'Autoroute A4, ainsi que le remblai routier permettant le passage de la RD 26 au-dessus de la LGV, vont tout naturellement créer un barrage aux écoulements gravitaires. Cela va engendrer un lac d'air froid qui s'étendra en amont de l'ouvrage ferroviaire, ce lac pourra être dommageable pour la vigne.

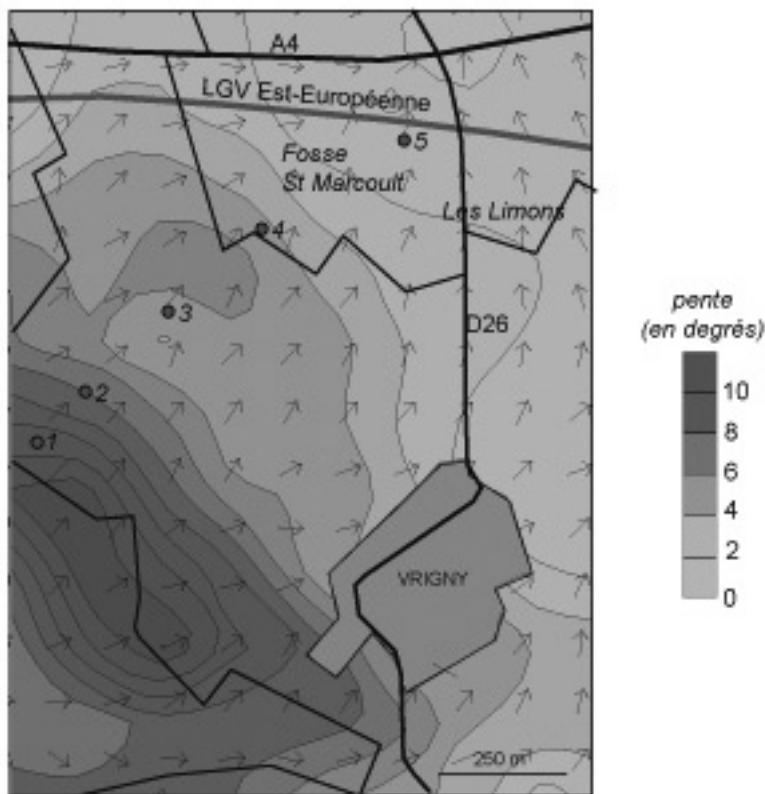


Figure 8 : Pente en degré, écoulement superficiel déduit de la pente et emplacement des postes de mesure à Vrigny (source des données : BD alti et BD topo de l'IGN). *Slope in degree, superficial flow deduced from the slope and site of the measurement stations in Vrigny (source of the data: BD alti et BD topo de l'IGN).*

Les faibles pentes (entre 0 et 3°) à proximité du remblai ferroviaire ainsi que les écoulements théoriques (calculés à partir de la pente) favorisant la convergence de l'air froid et sa stagnation, au moins temporelle, dans la Fosse Saint Marcoult, avant évacuation vers la vallée au nord. Les capteurs de

températures en IA ont été disposés suivant un transept sud-ouest/nord-est entre le milieu du versant (point 1, à 145 m) et la zone sub-horizontale (point 5, 100 m) proche de la LGV. Quatre thermomètres sur cinq sont dans le vignoble, le cinquième sur le point le plus bas en amont du remblai.

Les mesures se sont déroulées au printemps 2002, à nouveau pour les nuits favorables à un fort refroidissement nocturne. Seulement deux nuits ont finalement été exploitables : celle du 16 au 17/04 (temps nuageux en début de nuit puis clair avec quelques passages nuageux jusqu'au lever du jour, vitesse du flux à 2 m, entre 1 et 2 m/s durant la nuit) et celle du 20 au 21/04 (nuit claire avec vitesse des écoulements inférieure à 2 m/s). Ce nombre de nuits très faible pour une étude de climatologie, a été imposé par les contraintes du chantier.

3. Blocage des écoulements superficiels par la bâche dans les Fonds de Sillery

3.1 Les différences de températures sans et avec la bâche

La figure 9A montre la température minimale en IA de la nuit du 31/03 au 01/04 2001 (bâche non montée). Les températures les plus basses sont observées sur le secteur subhorizontal (-0,1°C sur le point de mesure le plus bas, entre 0,3 et 0,7°C sur les autres points bas qui sont tous situés hors du vignoble). Dans le vignoble, les températures minimales sont partout supérieures à 1°C.

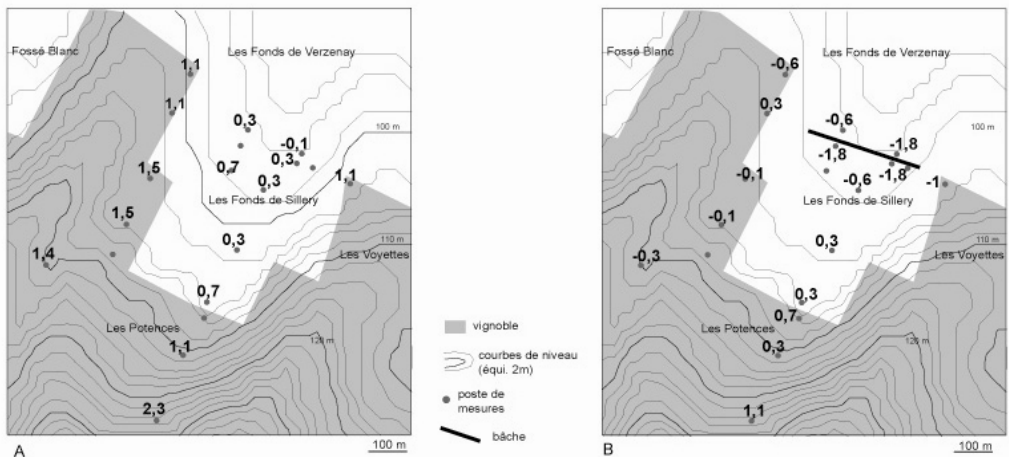


Figure 9 : Valeur minimale de la température en Indice Actinothermique sur le site des Fonds de Sillery pour la nuit du 31 mars au 1^{er} avril (A) et du 21 au 22 avril (B). *Minimal value of the temperature in Actinothermic Index on the site of the Fonds de Sillery for the night of March 31 at April 1 (A) and from the 21 to April 22 (B).*

La figure 9B montre la température minimale en IA de la nuit du 21 au 22 avril (Bâche montée). La répartition spatiale des températures est proche de celle observée le matin du 1^{er} avril, mais la nuit a été plus froide ce qui laisse

penser que le remblai (bâche) a peu d'incidence notable sur l'extension du lac d'air froid.

La comparaison de l'évolution des températures en IA durant les nuits où la bâche est installée par rapport à celles où elle est retirée, montre que cet obstacle à l'écoulement de l'air explique peut-être le fait que la température atteint sa valeur minimale plus tôt dans la nuit lorsque l'air ne peut s'écouler naturellement. Mais cela ne peut pas être clairement démontré car d'autres facteurs, variable d'une situation météorologique à l'autre, peuvent expliquer cette différence (humidité du sol, de l'air...). Après deux à trois dizaines de minutes, les températures sont similaires de part et d'autre du remblai, ce qui laisse à penser que lorsque l'air froid a rempli le barrage créé par le remblai, il passe au-dessus de celui-ci et la répartition spatiale des températures ressemble à celle d'une nuit sans bâche (remblai). On peut aussi imaginer, comme plusieurs auteurs l'ont déjà fait (Fallot, 1992), que l'air froid et lourd des brises de pente catabatique s'affaiblit près du sol et favorise la formation de poches froides dans les endroits abrités. (la figure 11 montre clairement la formation d'une telle poche froide). Comme la période de gel dommageable se situe toujours en fin de nuit, le remblai peut donc créer un risque de gel supplémentaire si la vigne est implantée en contrebas de cet obstacle. Dans les Fonds de Sillery, les parcelles viticoles ne sont pas concernées par ce lac d'air froid cantonné hors des limites de l'A.O.C. sur les terres de grandes cultures (blé de semences en 2001) qui ne sont pas sensibles à ce phénomène.

3.2 Modélisation spatiale de la température dans les Fonds de Sillery

Les données de température en IA, mesurées dans la station météorologique automatique de Verzenay TGV (installée à environ 600 mètres de la future LGV) ont été utilisées en complément des mesures de terrain. Le coefficient de corrélation entre cette station et sa voisine (Sillery), implantée à moins de 2 km, est de + 0,98 (calcul sur les données minimales quotidiennes entre le 15 mars et le 30 mai 1998 à 2000, soit 238 valeurs). Cette valeur étant largement significative, il est donc possible par un modèle de régression simple d'évaluer les températures à Verzenay TGV en utilisant les données de Sillery. C'est ce qui a été fait pour le printemps 2001 (saison où certains matins la bâche était montée) et les données estimées ont été comparées à celles mesurées (résultats publiés dans Beltrando & *al.*, 2002). Les résultats montrent que la présence ou l'absence de la bâche (remblai) n'entraîne pas de changement significatif de la température en IA à Verzenay TGV, mais bien évidemment la significativité de cette étude est faible dans la mesure où elle ne porte que sur 4 nuits d'observations.

4. Le lac d'air froid à Vrigny et les aménagements prévus pour réduire son influence sur le gel

Quelques mois après la remise des conclusions de l'étude sur les Fonds de Sillery, les viticulteurs riverains de la future ligne, mais sur d'autres secteurs, ont aussi manifesté des inquiétudes similaires. Après analyse des plans de la LGV, d'autres secteurs ont été analysés afin d'avoir une évaluation de ce que pourrait être le lac d'air froid bloqué en amont du remblai. Celle réalisée à Vrigny est résumée ici. Sur ce site, la campagne de mesure s'est déroulée durant le printemps 2002, toujours pour les situations météorologiques de type radiatif. Il n'y a pas eu, à nouveau, durant ce printemps de températures très basses comme cela se produit certaines années. Cependant l'analyse des données permet d'observer une forte variabilité spatiale des températures engendrée principalement par la topographie du site. Cela est suffisant pour en tirer quelques conclusions extrapolables sur la répartition spatiale de l'air froid et par conséquent sur les secteurs qui pourraient enregistrer un aléa du gel plus important après construction de la ligne.

4.1 La répartition spatiale des températures minimales en situations radiatives

La figure 10 présente les températures minimales en IA relevées le matin du 21 avril 2002. La situation atmosphérique de la nuit est caractérisée par un ciel clair et un vent de nord inférieur à 2 m/s tout au long de la nuit. Les températures les plus basses sont relevées dans le secteur subhorizontal de la Fosse St-Marcoult ($-0,6^{\circ}\text{C}$) et un gradient thermique (de 2°C) apparaît dans le bas du coteau pour un dénivelé 45 m. Dans le vignoble, le gradient augmente plus rapidement dès que la pente est supérieure à 3° . On peut estimer que la limite du lac d'air froid se situe quelques mètres en contrebas du vignoble.

La figure 11 montre les températures minimales en IA mesurée le matin du 17 avril 2002. La situation atmosphérique est caractérisée par un ciel clair avec quelques voiles nuageux (notamment en début de nuit jusqu'à 22h00, puis entre 03h00 et 05h00). Les températures les plus basses sont à nouveau observées dans le secteur subhorizontal de la Fosse St-Marcoult ($0,7^{\circ}\text{C}$). Le gradient thermique entre les points 1 et 5 est plus fort que dans l'exemple précédent ($3,2^{\circ}\text{C}$ à 6h50, toujours pour un dénivelé de 45 m), mais c'est surtout le point bas qui enregistre une baisse très nette à partir de 5h 50.

Les mesures micrométéorologiques du printemps 2002 ont montré la présence d'une masse d'air froid dans le secteur subhorizontal, au niveau de la Fosse St Marcoult (secteur hors vignoble). Le vignoble, situé sur le coteau, n'a pas enregistré en 2002, de températures suffisamment froides pour générer des dégâts. Ces résultats traduisent la situation aérologique et thermique nocturne sur le site initial avant l'implantation du remblai. Afin d'estimer le secteur viticole où le refroidissement nocturne sera accentué par l'implantation du

remblai ferroviaire, une modélisation spatiale du lac d'air froid a été réalisée en fonction de la pente, de l'emplacement du vignoble et des caractéristiques des ouvrages d'art (remblai routier et ferroviaire).

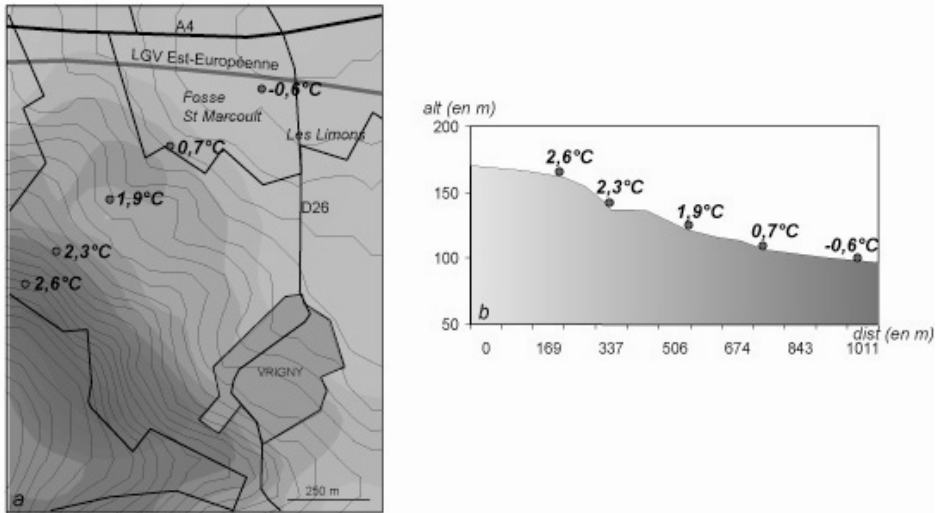


Figure 10 : Valeur minimale de la température en Indice actinothémique de la nuit du 20 au 21 avril 2002 : (a) vue en plan, (b) vue en coupe sud-ouest nord-est (voir légende de la pente sur fig. 8). *Minimal value of the actinothemic temperature Index of the night from the 20 to April 21, 2002: (a) seen in plan, (b) cross-section from north-eastern to south-western (see legend of the slope on fig. 8).*

Les mesures ont permis de repérer la présence d'une masse d'air froid dans le secteur subhorizontal, au niveau de la Fosse St Marcoult (secteur hors vignoble). Le vignoble n'a pas été affecté (en 2002) par ce lac d'air froid, qui pour les nuits de mesures est resté cantonné dans la Fosse St Marcoult. Cela malgré la présence du mur antibruit de l'autoroute A4, dont la hauteur est telle que le lac froid n'affecte pas le vignoble. Il n'en sera pas de même avec la LGV, qui pour des raisons techniques (normes de pente, de rayon de courbure...) doit être aménagée ici sur un remblai plus haut que l'autoroute qu'elle va longer. Le mur antibruit qui surmontera ce remblai sera donc inévitablement plus haut que celui de l'autoroute.

Ces résultats traduisent la situation aérologique et thermique nocturne sur le site avant l'implantation du remblai de la LGV. Afin d'estimer le secteur viticole où le refroidissement nocturne sera accentué par l'implantation de l'ouvrage ferroviaire, une modélisation spatiale du lac d'air froid a été réalisée en fonction de la pente, et en tenant compte de l'emplacement du vignoble ainsi que des caractéristiques de l'ouvrage d'art (mur antibruit en remblai de la rampe d'accès de le RD 26 au-dessus de la LGV).

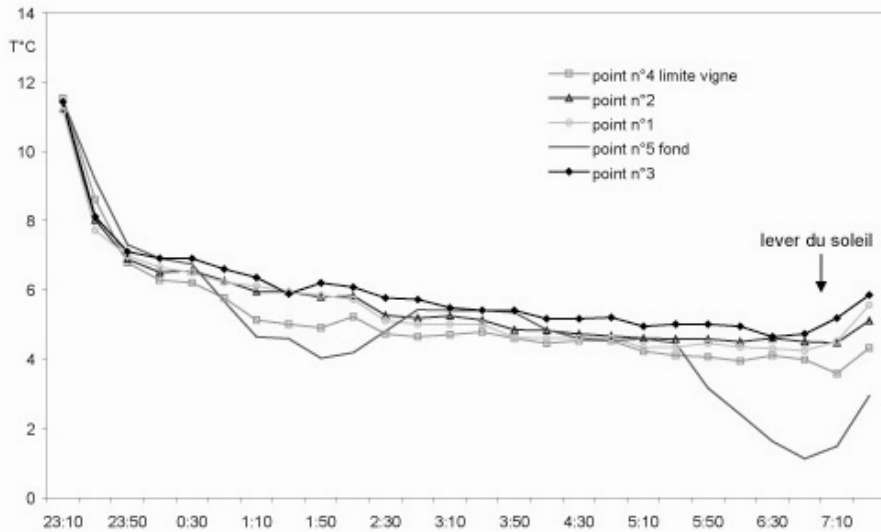


Figure 11 : Températures en indice actinothémique durant la nuit du 16 au 17 avril 2002 dans le bas du coteau de Vrigny (moyenne des températures toute les 20 mn). *Temperatures in actinothemic index during the night from the 16 to 17 April 2002 in the bottom of the slope of Vrigny (average temperature all 20 mn).*

4.2 La simulation du lac d'air froid en amont du remblai

L'estimation de la surface du lac d'air froid dans la Fosse St Marcoult, après l'implantation de la LGV, est obtenue en utilisant la courbe de niveau 106 m qui correspond à la hauteur totale prévue pour l'ouvrage dont les rails seront proches de l'horizontale dans ce secteur. Avec cette première approximation, le lac recouvrira le vignoble à l'est de la RD 26, mais il restera éloigné du vignoble à l'ouest de cette route (non montré). Cependant, un vent de vitesse faible, d'échelle régionale ou synoptique, peut déplacer l'air froid de ce lac d'air sur les pentes les moins importantes sans déstructurer l'inversion thermique des premiers mètres (Cellier, 1989) : lors de l'étude climatique dans le vignoble des Fonds de Sillery, nous avons observé qu'un vent faible (autour de 1 à 2 m/s, car au-delà le mélange est plus important et la stratification froide disparaît), du quadrant nord, pouvait déplacer la masse d'air froid lorsque la pente était inférieure à 3° environ.

Ici, par vent de nord à est, l'air froid stocké par le barrage peut donc atteindre le secteur viticole situé de part et d'autre de la RD 26. Les travaux antérieurs ont montré que le niveau supérieur du lac d'air froid reste faiblement incliné (sa pente est estimée de manière très empirique à environ 3%), mais en présence d'une topographie proche de l'horizontale, cela correspond à plusieurs dizaines de mètres. Pour les secteurs du vignoble où les pentes sont plus élevées (>3°), il y a moins de risque d'extension du lac d'air froid, sauf dans le fond des cuvettes ou lorsqu'un obstacle (naturel ou anthropique) permet la création d'un

lac d'air froid. D'après la simulation s'appuyant sur les résultats de ces constats (pente 3% en direction du sud et du sud-ouest), le risque de gel supplémentaire imputable au remblai apparaîtra donc à l'est de la RD 26, tandis qu'il restera restreint à l'ouest de cette route parce que l'intensité de la pente dans les vignes est plus forte. Les secteurs de vignes touchés par le déplacement du lac d'air froid sont estimés à environ 11 ha (figure 12).

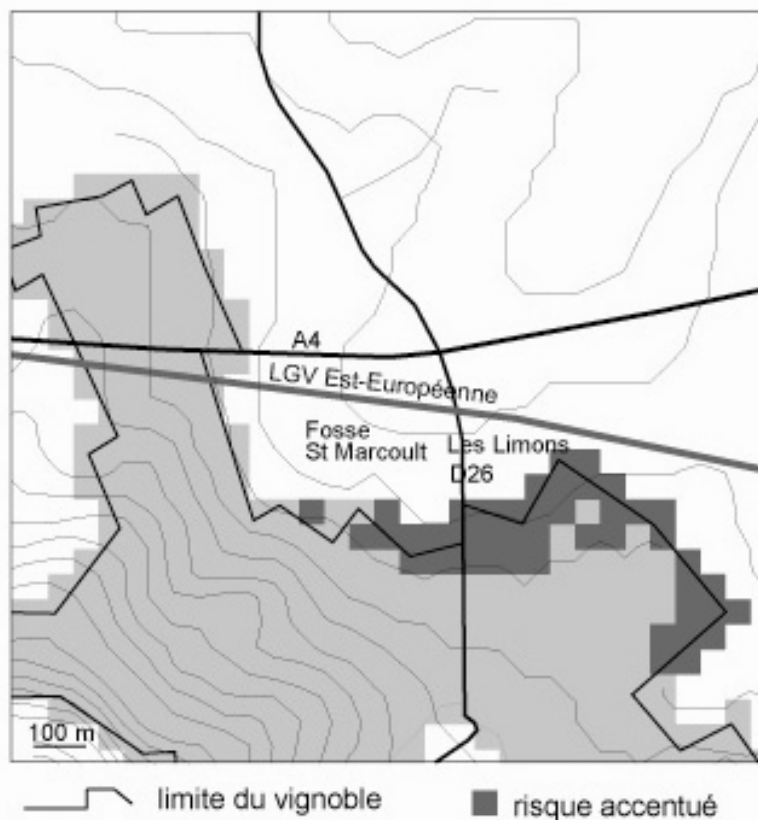


Figure 12 : Estimation de la surface du vignoble pour laquelle le risque de gel d'origine radiative sera accentué par le remblai de la LGV avec un vent faible de secteur nord (pixel de 50 m de côté, source des données analysées : BD Alti de l'IGN). *Estimation of the surface of the vineyard for which the risk of freezing of radiative origin will be accentuated by the embankment of the LGV with a weak wind of northern sector (pixel of 50 m dimensioned, source of the analyzed data: BD Alti of the IGN).*

4.3 Proposition d'aménagement du remblai de la LGV à Vrigny

A Vrigny, des aménagements du type de ceux proposés, dans l'APD pour le site des Fonds de Sillery n'ont pu être envisagés parce que le mur antibruit est réclamé par les riverains de la LGV. Le remblai routier permettant le passage de la RD 26 au-dessus de la LGV (cette route passe déjà au-dessus de l'autoroute mais l'emprise du remblai est beaucoup moins importante côté vignoble) est

aussi nécessaire et il impose le respect de normes techniques en particulier une longueur conséquente. Afin d'essayer de concilier l'ensemble de ces contraintes, il a finalement été proposé de réduire la hauteur du remblai et du mur antibruit le long de la LGV à l'est de la RD 26, la fonction de protection contre le bruit étant assurée par le remblai routier de la RD 26 qui prendra alors une forme différente à l'ouest (Fig. 11). Pour limiter le volume du lac froid à l'ouest de cette route, il a aussi été décidé de créer une large ouverture dans le mur antibruit. Celle-ci, d'une section de 150 m², sera réalisée sous la RD 26 de manière à réduire le plus possible les nuisances phoniques lors du passage des trains et le remblai prévu pour cette route sera élargi en amont de l'ouverture. Cet aménagement reste un compromis, dont le coût est évalué par le bureau d'étude à 325 000 Euros HT.

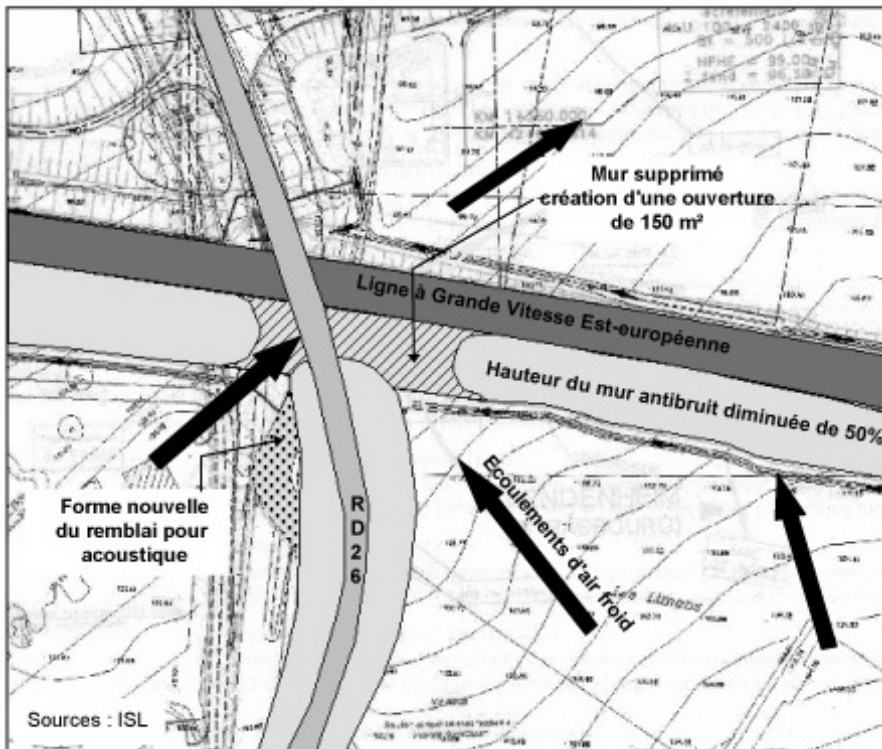


Figure 13 : Aménagements prévus dans le secteur de Vrigny pour limiter l'extension du lac d'air froid dans le vignoble (adapté d'un document du bureau d'étude ISL). *Installations envisaged in the sector of Vrigny to limit the extension of the lake of cold air in the vineyard (adapted of a document of the engineering department ISL).*

Conclusion

L'étude montre qu'un ouvrage implanté en bas d'un coteau forme un barrage à l'écoulement de l'air froid qui ne peut plus s'écouler vers les parties les plus

basses, généralement hors du vignoble. Pour les situations de type radiatif, cela se traduit par la formation d'un lac d'air froid qui, au printemps, peut entraîner des dommages pour la vigne sensible au gel à cette période de son cycle. Les résultats de ces mesures ont permis la négociation d'aménagements de la LGV est européenne afin de réduire le risque de gel supplémentaire qu'aurait pu créer cet ouvrage.

Sur le site des Fonds de Sillery, la construction d'une bâche pour simuler un futur remblai ferroviaire ainsi que les mesures de température et d'écoulement d'air froid réalisées à proximité ont permis de mieux caractériser l'aérogologie de surface lors de situations de type radiatif. Les aménagements proposés par le Maître d'œuvre semblent suffisants pour réduire sensiblement le risque supplémentaire de gel. Les quelques mesures réalisées durant 5 nuits semblent indiquer que le remblai de la LGV ne devrait pas avoir de répercussions sur le gel dans l'aire A.O.C. Sur un autre site, à Vrigny, les contraintes étaient de nature différente et des aménagements ont été proposés pour réduire ce risque de gel dans le vignoble (modification de la forme du mur antibruit, ouverture dans ce mur à un endroit où les nuisances sonores devraient peu affecter les riverains).

Cette approche empirique a permis de mieux préciser la nature et l'intensité des écoulements d'air froid sur deux sites viticoles prestigieux et d'extrapoler l'effet que pourra avoir un remblai qui, inévitablement, va modifier la circulation de l'air froid en situation favorable à un fort refroidissement nocturne de type radiatif. Mais il est évident que les résultats ne peuvent être pleinement satisfaisants parce qu'une telle étude ne peut s'appuyer que sur quelques campagnes de mesures (calendrier du projet), ce qui est forcément discutable. Comme les autres méthodes (physique, numérique) cette approche à des limites, mais ici l'avantage est de disposer de mesures réalisées *in situ* lors des périodes où le risque de dommages existe ce qui permet de prendre en compte la réalité du terrain dans toute sa complexité, ce qui n'est pas possible avec les autres méthodes. Malgré la faible durée de l'étude imposée par le Maître d'Ouvrage, cette démarche a permis de valider un certain nombre d'hypothèses et de proposer des aménagements spécifiques afin que le projet de ligne nouvelle génère le moins de perturbations possibles et qu'il soit mieux accepté par ceux qui vont devoir vivre à proximité de cet ouvrage.

Remerciements

Ces études ont été financées par Réseau Ferré de France – mission TGV Est. Elles ont pu être réalisées dans de bonnes conditions techniques grâce au soutien du Syndicat Général des Vignerons de la Champagne et des Services Techniques du Comité Interprofessionnel du Vin de champagne. Nous remercions toutes les personnes, appartenant à ces deux structures, qui nous ont aidées, ainsi que les responsables du groupement TDE-COB et ISL qui ont manifesté beaucoup d'attention pour ces études climatiques, nouvelles pour eux. Nous remercions aussi les vignerons de Verzenay et de

Vrigny qui ont apporté leur aide chaque fois qu'elle a été demandée et toujours dans la bonne humeur quelle que soit l'heure du jour ou de la nuit.

Bibliographie

- BELTRANDO G., 1998 : Les gelées printanières en Champagne viticole. *La Météorologie*, 8^{ème} série, **21**, p. 30-43.
- BELTRANDO G., BRIDIER S. ET QUÉNOL H., 1995 : *Estimation des modifications thermiques générées par le remblai de la future ligne du TGV EST Européen dans le vignoble de Champagne*. Rapport d'étude pour le SGV et la SNCF, 56p.
- BELTRANDO G., BRIDIER S., MADELIN M. et QUENOL H., 2002 : Evaluation de l'impact d'un futur remblai de la ligne à Grande Vitesse est européenne sur le risque de gel dans le vignoble de Champagne. *Revue Hommes Terres du Nord*, **1**, p. 40-52.
- BRIDIER S., QUÉNOL H. ET BELTRANDO G., 1995 : Evaluation de l'influence d'un ouvrage linéaire en remblai - le TGV Est - sur l'écoulement de l'air froid dans le vignoble champenois. *Pub. de l'Associat. Internat. de Climatologie*, **8**, p. 233-240.
- BRIDIER S., QUÉNOL H. ET BELTRANDO G., 2004 : Simulation du potentiel de refroidissement en situation radiative. *Rev. Inter. de Géomatique*, **14**, n°1, p. 119-132
- CARREGA P., 1994 : *Topoclimatologie et habitat*. Revue d'Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée, Th. Et., 35 & 36, 408 p.
- CELLIER P., 1989 : Mécanismes du refroidissement nocturne : application à la prévision des gelées de printemps. *Actes de séminaires de la Com. d'agrométéo. De l'INRA « le gel en agriculture »*, p. 145-164.
- FALLOT J.M., 1992 : Etude de la ventilation d'un grande vallée préalpine (la vallée de la Sarine en Gruyère). Thèse de l'université de Fribourg (Suis), 475 p.
- HERTIG J.A., 1986 : La physique de l'atmosphère et les îlots de chaleur au dessus des villes. Possibilités et limites de la modélisation. *Archives des Sciences*, **39-3**, p. 299-324.
- HUGLIN P., 1986 : *Biologie et écologie de la vigne*. Ed. Payot (Lausanne), 372 p.
- KANG S., MOTOSUGY K., YONOMORI K. et SUGIURA A., 1998 : Supercooling characteristics of some deciduous fruit trees as related to water movement with the bud. *J. Hort. Sci. & Biotechnology*, **73**, p. 165-177.
- KASTENDEUCH P., 1996 : *Analyse à plusieurs échelles et modélisation des régimes de vents d'été dans le Fossé Rhénan méridional*. Thèse de Doctorat de l'Université Louis Pasteur (Strasbourg I), 175 p. + annexes.
- LEDDET C. et DEREUDDRE J., 1993 : La résistance au gel des bourgeons. *Actes de séminaire de la Commission d'agrométo. de l'INRA 'Le gel en agriculture'*, p. 113-128.
- MARTH L., 1986 : *Nocturnal topoclimatology*. WMO, 117, TD 132, Geneva, 76 p.

- PERRIER M., 1996 : *Impact climatique de la tranchée routière de la déviation de Bergerac : simulation hydraulique de l'écoulement d'air froid entre les vallées de Caudeau et de la Dordogne*. Rapport Météo-France CNRM/GMEI/SPEA, 17 p.
- WANNER H., 1991 : *Bienne, climat et pollution atmosphérique d'une ville suisse*. Ed. P. Haupt, Berne et Stuttgart, 455 p.
- YOSHINO M., 1975 : *Climate in a small area : an introduction to local meteorology*. University of Tokyo Press, 549 p.