

RESUME

Méthode d'examen

Afin d'évaluer le sous-sol, notamment en ce qui concerne les activités minières antérieures sur le site, des forages par carottage rotatif ont été réalisés en plus des études géophysiques au niveau même des forages et entre les forages.

Les forages ont été disposés entre les galeries minières en fonction des données cartographiques disponibles. L'espacement des forages a été choisi de manière à ce qu'une étude complète de l'emplacement potentiel des éoliennes soit possible avec des diamètres de fondation standards de 20 à 24 mètres pour ce genre d'installation, et qu'une qualité de signal suffisante peut être attendue lors des mesures géophysiques entre les forages.

Les levés géophysiques ciblent principalement les cavités et les zones de perturbation entre les forages.

Lors de l'évaluation, il faut tenir compte du fait qu'en raison de leur disposition ciblée entre les couches cartographiées des galeries, les forages présenteront un nombre de cavités et d'effets de foisonnement légèrement inférieur à celui qui est représentatif du site et que, à cet égard, les résultats de la géophysique doivent généralement être considérés comme décisifs.

Structure souterraine explorée

En principe, la structure du sous-sol exploré peut être divisée en plusieurs couches principales.

Couche 1 : couche arable

La couche supérieure du sol est formée par une couche arable d'une épaisseur variant entre 0,2 et 0,5 m.

La consistance peut être décrite comme rigide, mais avec une grande sensibilité à l'humidité.

Couche 2 : sable-siliceux, pierreux

En-dessous de la couche arable se trouve généralement une couche pierreuse, sablonneuse et limoneuse.

Les levés géophysiques effectués indiquent la présence de zones de perturbation entre les forages.

Alors que cette couche se situe au niveau de l'éolienne 1 jusqu'à un maximum de 3,7 m en dessous du niveau du sol actuel, dans la zone de l'éolienne 2, elle est nettement plus profonde jusqu'à un maximum d'environ 11,2 m en dessous du niveau du sol actuel.

Couche 3 : grès

La troisième couche découverte par forage est faite de roches grésocalcaires. Des zones dures et compactes alternent avec des zones altérées par les intempéries et des zones entrecoupées de surfaces de séparation.

Dans la zone de l'éolienne 1, la couche est beaucoup plus épaisse et s'étend jusqu'à un maximum d'environ 19,6 m sous le niveau du sol actuel. En revanche, dans la zone de l'éolienne 2, cette couche n'a généralement qu'une épaisseur de quelques décimètres ou est complètement absente (EB5). Dans la zone de l'éolienne 2, la couche se trouve jusqu'à un maximum de 12,4 m sous le niveau du sol actuel.

Cette couche abrite des cavités de plus grandes dimensions. Les études géophysiques ne parviennent qu'à une faible connexion entre les points de forage dans cette zone, ce qui indique une zone globalement fortement perturbée.

Couche 4 : marne micacée

A une profondeur de 400 et 403 m, les forages révèlent de la marne micacée. Aux deux sites, l'épaisseur est similaire et se situe en moyenne à environ 17 m.

Dans la zone des marnes micacées, le sol extrait par forage peut être décrit comme relativement peu perturbé avec peu de surfaces de séparation. Aucune cavité n'a été décelée par forage. À cet endroit, les études géophysiques montrent également de meilleures connexions entre les points de forage et des vitesses d'ondes plus élevées.

Couche 5 : Fe-oolithes (fortement perturbé ou décomposé)

En perçant la marne micacée à environ 382 m, on rencontre une zone fortement perturbée de Fe-oolithes. La zone forée est traversée par des cavités, dont certaines ont plusieurs mètres de hauteur. Entre les cavités, on observe une formation de surfaces de séparation prononcée alternant avec des zones désintégrées ou déconsolidées. L'étude géophysique indique des cavités de plus grandes dimensions entre les forages. Dans certains cas, les perturbations et les cavités sont si prononcées qu'il est impossible d'établir un lien entre les forages dans le cadre des recherches géophysiques.

Couche 6 : Fe-oolithes/calcaire (compact)

Au site de l'éolienne 1 à une profondeur d'environ 362 m et d'environ 360 m au site de l'éolienne 2, la couche Fe-oolithe est présente sous une forme compacte et non perturbée. L'étude géophysique montre également une bonne connexion entre les forages et des vitesses d'ondes élevées dans cette couche, ce qui indique des zones largement non perturbées avec peu de surfaces de séparation et de fissures entre les forages.

A partir de ces profondeurs, les sols sont à classer comme roches solides non influencées par l'exploitation minière.

Eaux souterraines

Les eaux souterraines n'ont pas été explorées.

Situation du sous-sol en fonction du lieu

Sous-sol au site de l'éolienne 1

Au site de l'éolienne 1, la roche grésocalcaire (couche 3) est recouverte de sol meuble (couches 1 et 2). L'épaisseur de la couche de sol meuble varie considérablement entre quelques décimètres et près de 4 mètres. La zone de grès se trouve alors à des profondeurs comprises entre 18 et 19,5 mètres sous le niveau actuel du terrain. L'étude géophysique ne montre qu'une faible connexion entre les forages dans ces zones de sol (couches 1 à 3), ce qui indique une perturbation prononcée du sous-sol à cette profondeur.

En perçant la roche grésocalcaire (couche 3), on atteint la marne micacée (couche 4) d'une épaisseur moyenne d'environ 17 mètres. Les forages montrent une composition relativement homogène de cette couche. Les densités élevées ne peuvent être déduites des résultats des tests que dans les 5 mètres supérieurs de la couche, tandis qu'une nette diminution est visible en-dessous des 5 mètres.

Sous la marne micacée se présente la Fe-oolithe initialement fortement perturbée à désintégrée (couche 5). Dans cette couche, on trouve également des cavités de plusieurs décimètres au niveau du site de l'éolienne 1. Les résultats des relevés géophysiques indiquent l'existence de cavités plus grandes entre les forages. Dans l'ensemble, au niveau de l'éolienne 1, cette couche peut être décrite comme fortement perturbée et fortement relâchée.

Au site de l'éolienne 1, la couche meuble diminue dans la couche Fe-oolithe, entre environ 365 m et environ 362 m, et à partir d'environ 362 m de profondeur, on y trouve une couche Fe-oolithe et calcaire (couche 6) compacte, en grande partie non perturbée. Ici, les mesures géophysiques font également apparaître une nette augmentation de la vitesse d'ondes, preuve supplémentaire de la présence d'une formation rocheuse solide.

Dans la zone de l'éolienne 1, l'éroulement peut être classé comme étant très avancé. Par conséquent, les cavités restantes identifiées ou à déduire ne présentent que des fractions du volume de la galerie d'origine. Cependant, le stade avancé de l'éroulement a également entraîné une perturbation et un relâchement prononcés des couches inférieures et

supérieures de la zone d'excavation, de sorte qu'on ne peut plus parler d'un composé rocheux.

En résumé, l'influence de l'ancienne activité minière est clairement présente sur le site de l'éolienne 1. Outre les affaissements déjà manifestement expirés, il existe un potentiel d'affaissement supplémentaire résultant d'une consolidation des zones meubles et de l'éroulement au niveau des cavités encore existantes. En particulier dans le cas de l'éroulement des cavités, il faut considérer que la roche dure sus-jacente présente des perturbations et des surfaces de séparation distinctes dues aux tassements et aux éroulements déjà survenus, qui ont perturbé le composé rocheux à un point tel qu'un effet de répartition, comme dans la roche dure non perturbée, ne peut plus être considérée.

Sous-sol au site de l'éolienne 2

Concernant la structure en couche en général, la situation du sous-sol au site de l'éolienne 2 diffère en un seul point de celle au site de l'éolienne 1. La zone de sol meuble forée (couches 1 et 2) s'étend beaucoup plus profondément, jusqu'à un maximum d'environ 11,2 m de profondeur, tandis que la zone de grès (couche 3) est beaucoup moins épaisse et, à certains endroits, complètement absente. La couche de grès (couche 3) se situe déjà à des niveaux compris entre 400 m et 402 m de profondeur. Sur le site de l'éolienne 2, les premières cavités apparaissent déjà dans la couche de grès (couche 3).

Dans la zone des marnes micacées (couche 4), la situation est très similaire à celle au site de l'éolienne 1.

Au site de l'éolienne 2, le Fe-oolithe se trouve à partir d'environ 382 m de profondeur. Il est caractérisé par des surfaces de séparation partiellement distinctes, mais au site de l'éolienne 2, la formation de surfaces de séparation semble moins prononcée. Mais en même temps, des cavités de plus grandes dimensions, jusqu'à plusieurs mètres, sont rencontrées dans les forages au site de l'éolienne 2. A une profondeur d'environ 380 et 370 m, les mesures géophysiques permettent également de différencier plus clairement entre des zones de roches solides avec moins de formation de zones d'interférence, et deux zones à vitesses d'ondes fortement réduites. En conséquence, la couche de Fe-oolithe peut être divisée en une zone fortement perturbée ou décomposée (couche 5) et une zone compacte (couche 6). La différenciation possible entre les zones de différentes vitesses d'ondes peut être considérée comme une indication qu'à cet endroit, il existe des cavités contiguës encore plus grandes sous forme d'anciennes galeries minières et que l'éroulement des plafonds intermédiaires est encore moins prononcé.

En résumé, l'influence des activités minières antérieures est également fortement présente au site de l'éolienne 2. Les affaissements manifestement déjà expirés influencent ici un peu plus fortement la zone du sous-sol plus proche de la surface du sol. En revanche, plus en profondeur, il y a encore des zones moins éroulées et, par conséquent, des systèmes de galeries encore (partiellement) intacts. Il existe ici également un potentiel d'affaissement supplémentaire en raison d'une consolidation de zones meubles et du post-éroulement dans la zone des cavités encore existantes.

Influence du sous-sol exploré sur les éléments de fondation de bâtiments

Sur les deux sites potentiels, les **conséquences de l'exploitation minière ont une influence** importante sur **la situation souterraine, ce qui est défavorable** à l'utilisation comme terrain à bâtir.

Le potentiel de tassement à la surface est ainsi accru, d'une part en raison de l'éroulement de cavités et d'autre part du fait de la consolidation des zones de fracture et meubles. En particulier, l'éroulement de cavités peut entraîner des tassements ponctuels avec un degré élevé d'affaissement, ce que l'on appelle des entonnoirs ou des crevasses en surface.

Les failles prononcées dans les zones de roche solide ont entraîné une perturbation de la structure de la roche. Par conséquent, dans de nombreuses zones, l'effet de répartition de la charge et du tassement d'une voûte rocheuse sur des cavités ou des éroulements secondaires n'est plus donné.

Dans le cas de fondations profondes (par exemple au moyen de pieux), les affaissements des zones de sol adjacentes peuvent entraîner des charges supplémentaires sur les éléments de la fondation.

Discussion sur les différentes variantes possibles pour les fondations

Les enquêtes montrent que sur les deux sites potentiels étudiés, il y a une influence sur le sous-sol causée par d'anciennes exploitations minières.

En principe, une fondation devrait être conçue sur des tassements d'un ordre de grandeur d'un mètre répartis inégalement sur le site de construction. En outre, il faut tenir compte de l'éventuelle défaillance locale de la résistance du sol à la suite d'un effondrement et d'éventuels écroulements ultérieurs dans un rayon de 8 à 14 mètres.

Fondation directe sur remplissage de cavités

Le type de fondation le plus courant pour les éoliennes est la fondation directe circulaire ou annulaire sur un sous-sol suffisamment porteur ou amélioré. Dans le cas présent, la diminution de l'aptitude du sous-sol est principalement due aux cavités encore existantes dans le sous-sol qui risquent de s'effondrer, ce qui est typique des sites d'anciennes exploitations minières.

Dans de tels cas, une variante courante et techniquement mature de l'"amélioration" du sous-sol est un **remplissage solidaire, suffisamment stable ou porteur des cavités concernées.**

L'avantage de ces remplissages de cavités est la prévention pratique de nouveaux écroulements. Cela signifie qu'il est possible d'éviter les effondrements et de réduire considérablement les affaissements de la surface. Dans le domaine des anciennes mines, cette variante représente aussi généralement la solution la plus économique. **D'un point de vue technico-économique, cette variante est donc la solution privilégiée.**

Cependant, l'injection en profondeur des cavités peut entraîner une altération des voies de passage dans le sous-sol, éventuellement combinée à un impact sur la nature ou sur des biens protégés. **Compte tenu des exigences de protection de la nature et de l'environnement (préservation extensive des galeries et cavités en tant qu'habitat pour les chauves-souris), cette option peut donc être problématique sur le site et éventuellement pas réalisable.** À cette fin, l'évaluation des autorités techniques et, le cas échéant, des experts techniques doit être sollicitée.

Fondation profonde par pieux

Une autre solution pour éviter un tassement excessif est la fondation profonde au moyen de pieux en-dessous des zones de tassement. Dans ce cas, les charges de la structure sont transférées par les pieux dans les zones du sous-sol ayant une bonne capacité portante et une faible susceptibilité au tassement.

Dans le cas présent, cela se traduit par de grandes longueurs de pieux, car la répartition des charges n'est possible qu'à des profondeurs de 51 à 57 mètres sous le niveau actuel du terrain. Les couches supérieures ne sont pas adaptées au transfert de charge. Au contraire, il faut tenir compte des charges supplémentaires exercées par le frottement superficiel de ces couches sur les pieux.

En raison des grandes cavités et des surfaces de séparation partiellement prononcées dans la zone du sous-sol à pénétrer, **les tubes de protection doivent rester dans le sous-sol ou des manchons de stabilisation doivent être insérés pour bétonner le pieu jusqu'à la roche dure compacte de la couche 6.** Outre les systèmes de manchons, une suspension à prise rapide serait également envisageable.

Dans ce cas, la solution recommandée est un système qui réduit la transmission de la force au pieu.

Par rapport à la variante précédente, celle-ci engendre une multiplication des coûts et du temps nécessaires à la production des éléments de la fondation.

Ce type de fondation permettra de préserver en grande partie les cavités existant dans le sous-sol. À la vue de la préservation susmentionnée des galeries dans le sous-sol, cette variante présente un avantage.

Fondation directe avec transfert de charge dans la zone supérieure du sol

Au niveau du site de l'éolienne 2, il serait également envisageable de construire une fondation directe classique, en combinaison avec une amélioration du sous-sol. En principe, cette variante correspond à la première variante décrite, sans remplissage de cavité. Afin d'éviter que la stabilité ne soit compromise par les effondrements, les fondations devraient être conçues de telle sorte que la perte de la capacité portante au niveau des fondations en raison des effondrements dans certaines zones, ne soit pas pertinente en matière de stabilité ou de la limitation du tassement.

Cependant, une conception sûre des fondations tenant compte de tous les impondérables et variantes, ne nous semble pas possible dans le cas qui nous occupe.

Compte tenu des résultats actuels de l'étude, cette variante n'est donc pas recommandée.

Variante de fondation recommandée

D'un point de vue technique et économique, et compte tenu du temps d'exécution requis et de la sécurité d'exécution, la variante de la fondation directe par remplissage de cavités et amélioration partielle du sous-sol est recommandée.

Compte tenu des aspects de conservation de la nature, notamment en ce qui concerne les chauves-souris présentes sur le site, la compatibilité de cette variante avec les exigences locales nous semble douteuse. À cette fin, il faudrait consulter un expert.

Si la variante techniquement préférée n'est pas réalisable sous les aspects de la protection de la nature mentionnés ci-dessus, à notre avis, la fondation sur pieux en combinaison avec un système de suspension ou de manchon dans les zones de roche solide non influencées par l'exploitation minière, est à recommander. A cela s'ajoutent les inconvénients mentionnés ci-dessus en ce qui concerne les dépenses supplémentaires élevées sur le plan technique, économique et temporel.