

## MESURE DE DÉPLACEMENT PAR GNSS

### PRINCIPE ET DESCRIPTION SOMMAIRE

OBJECTIF	Utilisation des systèmes satellites de géolocalisation et de navigation (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) pour mesurer en 3D les déplacements absolus des différentes parties d'un ouvrage afin de suivre son mode de fonctionnement au cours du temps.
PRINCIPE	<p>Le sigle GNSS fait référence aux constellations de satellites permettant le positionnement à la surface du globe. Cette appellation intègre notamment le GPS (développé par l'US Navy à partir des années 70 et rendu accessible publiquement en 2000), GLONASS (d'origine soviétique, système pleinement opérationnel depuis 2011), BeiDou (développé par la Chine, en fonction depuis 2003) et GALILEO (développé par l'Union européenne ; premiers services depuis 2016).</p> <p>Tous les GNSS reposent sur un fonctionnement similaire. Chaque système est divisé en trois segments : un segment spatial comportant les satellites diffusant en permanence leurs signaux, un segment de contrôle avec des stations terrestres chargées de contrôler le bon fonctionnement des satellites, et enfin le segment utilisateur, des usagers équipés de stations GNSS, capables de se positionner à la surface du globe à l'aide des signaux reçus. La position obtenue est référencée et ne présente pas de dérive au cours du temps (pas de dérive des capteurs).</p> <p>La navigation traditionnelle par GNSS, précise à quelques mètres, repose sur la comparaison entre les signaux reçus par les satellites et des signaux générés dans le récepteur pour estimer les pseudodistances avec chaque satellite et calculer la position du récepteur par trilatération.</p> <p>Le positionnement précis repose lui généralement sur un calcul dit « sur la phase », c'est-à-dire utilisant la phase des ondes porteuses pour améliorer la précision des mesures. Cette approche est complexe et introduit de nouvelles inconnues associées au fait que le nombre de cycles (ou oscillations complètes) avec chaque satellite n'est pas mesuré (aussi appelée ambiguïté entière). Pour lever cette ambiguïté, plusieurs familles de calcul existent :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- le Positionnement Ponctuel Précis (PPP), qui exploite les données de modèles atmosphériques et d'orbites, ainsi que des corrections générées à partir d'un réseau de stations fixes, pour améliorer la fiabilité et la précision du calcul ;</li> <li>- le calcul relatif, qui combine les observations d'une station de mesure à celles d'une station de référence fixe à proximité ;</li> <li>- le calcul en réseau qui utilise plusieurs stations de référence.</li> </ul> <p>Pour toutes ces familles de calcul, on distingue également les approches en post-traitement, où les ambiguïtés sont résolues sur l'ensemble d'une série temporelle, et les approches en temps réel qui intègrent les nouvelles mesures en continu. Le temps réel se base uniquement sur des observations antérieures pour la résolution à une époque donnée. La résolution en temps réel est plus sensible aux sauts de phase et nécessite une élimination particulièrement robuste des erreurs. Selon les conditions d'exploitation, le matériel et la méthode de calcul utilisée, le positionnement précis peut atteindre une précision centimétrique, voire la dépasser pour des déplacements horizontaux (observations validées avec une précision de l'ordre de 4 mm dans des essais expérimentaux après lissage horaire des séries temporelles).</p> <p>Généralement, le calcul de positionnement précis n'est pas effectué « à bord » du capteur, mais sur un ordinateur/serveur distant à l'aide d'un logiciel dédié.</p>
CARACTÈRE DESTRUCTIF DE LA MÉTHODE	Non destructif

## MATURITÉ

Les évolutions des techniques et du matériel GNSS à partir des années 2000 permettent aujourd'hui d'avoir à disposition des solutions commerciales de pointe capables d'atteindre des précisions infracentimétriques en temps réel et avec un échantillonnage pouvant atteindre 100 Hz. Néanmoins, du fait de leur coût, ces dernières solutions ne concurrencent pas les accéléromètres pour le suivi dynamique.

Dans une optique de réduction des coûts, un intérêt pour les solutions GNSS à bas coût s'est développé depuis les années 2010 (Benoit et al. 2014). Ces solutions reposent sur un matériel avec des performances moindres comparées à celles des solutions commerciales de pointe, mais dont le traitement permet de partiellement compenser les faiblesses dans des scénarios déterminés.

L'étude de leurs performances dans des applications de surveillance géotechnique témoigne de leur compatibilité avec les applications de génie civil (Manzini 2020). L'utilisation de ce type de solutions GNSS a vocation à permettre le déploiement de réseaux de capteurs sur des ouvrages, et ainsi favoriser l'utilisation des technologies GNSS pour le suivi de leur comportement global.

## MATÉRIEL SPÉCIFIQUE EMPLOYÉ

Une station GNSS comporte systématiquement au moins les deux éléments suivants :

- le récepteur GNSS, chargé de collecter les signaux reçus des satellites GNSS, de les convertir soit en observations soit en messages de navigation, et d'effectuer au minimum une première estimation de la position ;
- l'antenne GNSS, reliée au récepteur à l'aide d'un câble coaxial, chargée de recevoir les signaux émis par les satellites.

Les solutions low-cost reposent initialement sur des récepteurs mono-fréquence et mono-constellation. Le secteur est en forte évolution et la notion de low-cost évolue rapidement, notamment avec l'introduction de récepteurs bi-fréquences, maintenant avec des prix plus abordables. Plus le matériel monte en gamme, plus ses performances sont élevées : récepteurs capables de suivre davantage de constellations et de bandes de fréquence, plus grand nombre de canaux pour le suivi des satellites et généralement échantillonnage plus élevé.

Certaines antennes sont qualifiées d'antennes intelligentes car elles comportent un récepteur intégré et un module de communication, les transformant en stations autonomes.



Exemple du capteur Geocube développé par l'IGN et Ophelia Sensors.

## MODALITÉS D'APPLICATIONS

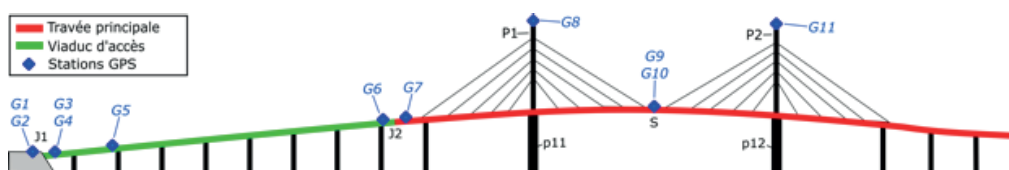
Suivi 3D des déplacements dans des applications géotechniques : glaciers, volcanisme, glissements de terrain, ouvrages de soutènement (instrumentés à leur sommet).

Suivi 3D des déplacements quasi-statiques sur les grands ouvrages, avec un ordre de grandeur multi-centimétrique des déplacements : effets liés à la dilatation thermique, à la présence de gradients thermiques, à la composante statique du vent, au trafic (détection de périodes de congestion), à l'affaissement du terrain (instabilité des fondations).

Les différents types de matériels et de calculs conditionnent significativement la performance du système (cf. paragraphe sur la précision et la sensibilité) et donc le domaine d'utilisation de cet outil.

## DOMAINE D'APPLICATION

L'utilisation d'un système en positionnement relatif avec une référence à proximité de l'ouvrage (ou du parc d'ouvrages) suivi(s) permet de facilement mesurer les déplacements dans un référentiel local adapté



Exemple de l'instrumentation du pont de Brotonne à partir de mai 2017 avec un réseau de 12 stations Geocube (l'échantillonnage des données GNSS est fixé à 30 s).

<p>DOMAINE D'APPLICATION</p>	 <p>Déplacements longitudinaux observés sur le tablier (l'ordonnée à l'origine représente la position moyenne sur l'année) – pont de Brotonne (Manzini, 2020).</p>  <p>Déplacements transversaux (l'ordonnée à l'origine représente la position moyenne sur l'année) et gradients thermiques observés sur les pylônes du pont de Brotonne (Manzini, 2020).</p>
<p>SUJÉTIONS PRATIQUES D'INTERVENTION</p>	<p>Les antennes GNSS doivent être positionnées de façon à avoir le plus grand angle de ciel visible, et éviter les obstacles réfléchissants ou mobiles (par exemple trafic routier) proches.</p> <p>En cas de chutes de neige possibles, prévoir des radômes en plastique sur les antennes évitant l'accumulation.</p> <p>Dans le cadre d'un déploiement de stations monofréquence, le calcul par Positionnement Ponctuel Précis ne permet pas d'atteindre une précision stable centimétrique, il est préférable d'utiliser un calcul relatif.</p> <p>Dans le cadre d'un calcul relatif avec des stations monofréquence, la station de référence fixe doit être installée au plus à quelques kilomètres de l'ouvrage.</p>
<p>LIMITES D'UTILISATION</p>	<p>Sensibilité aux multi-trajets : les multi-trajets sont les rebonds des ondes des satellites sur l'environnement autour de l'antenne, ce qui a pour effet de fausser les pseudodistances estimées avec les satellites ;</p> <p>Peu adapté pour du suivi dynamique : certaines fréquences propres intermédiaires peuvent ne pas être détectées par la station GNSS (amplitudes trop faibles) ;</p> <p>Ne convient pas à des latitudes supérieures à 60° ou inférieures à -60° ;</p> <p>Doit être protégé contre les dépôts de neige (il existe du matériel adapté avec radome pour les antennes).</p>
<p>PRÉCISION ET/OU SENSIBILITÉ</p>	<p>Calcul relatif monofréquence (après lissage horaire) : 0,5 cm à 1,5 cm horizontal, 1,5 cm à 2 cm en vertical, disponibilité des données après une heure.</p> <p>Calcul relatif multifréquence (après lissage horaire) : 0,5 cm à 1 cm en horizontal, 1 cm à 1,5 cm en vertical, disponibilité des données après une heure.</p> <p>Calcul relatif RTK : 1,5 cm à 2 cm en horizontal, 2,5 cm à 3 cm en vertical, disponibilité instantanée des données.</p> <p>Limites générales :</p> <p>Précision variable selon les conditions d'installation (obstacles avec le ciel) ;</p> <p>Pertes possibles liées à la non-convergence du calcul (observations mais pas de calcul de position exploitable) ;</p> <p>La pluie, et surtout la présence d'eau à proximité des antennes entraînant l'apparition de surfaces réfléchissantes, peuvent sensiblement affecter la précision du calcul avec des antennes peu protégées contre les multi-trajets.</p>
<p>PERSONNEL ET COMPÉTENCES</p>	<p>Un chargé d'investigations pour l'installation des capteurs et le relevé des mesures et un chargé d'études spécialiste en GNSS et en structure pour leur interprétation.</p>
<p><b>CARACTÉRISTIQUES OPÉRATOIRES</b></p>	
<p>ACCÈS À 1 OU 2 FACES</p>	<p>L'antenne GNSS doit être positionnée de façon à avoir le plus grand angle de ciel visible et le moins d'obstacles proches. Elle peut être surélevée pour éviter d'être à hauteur des véhicules pouvant occasionner des masques.</p>

COUPURES OU RESTRICTIONS DE CIRCULATION NÉCESSAIRES	Déploiement relativement aisé, installation en extérieur et en surface, à l'horizontale.
CIRCULATION NÉCESSAIRES	Coupures parfois nécessaires pour la mise en place.
RENDEMENT ET/OU ÉCHANTILLONNAGE	<p>Pour des stations monofréquence à bas coût, échantillonnage généralement entre 0,1 Hz et 10 Hz.</p> <p>Peut aller jusqu'à 100 Hz pour les solutions commerciales les plus puissantes.</p> <p>Selon les phénomènes suivis et le matériel utilisé, il peut être nécessaire de lisser les données avec un filtre temporel (ex : 5 minutes, 1 heure), diminuant l'échantillonnage effectif des résultats exploitables.</p>
DÉLAIS DE DISPONIBILITÉ DES RÉSULTATS	<p>Le positionnement par GNSS nécessite un traitement par logiciel pour passer des observations faites par les récepteurs à une donnée de position exploitable (au-delà d'une simple étape de conversion et correction, comme dans le cas de capteurs traditionnels).</p> <p>Dans le cadre d'un traitement en flux continu, en prenant en compte les temps de transfert et en supposant une puissance de calcul adaptée, le délai de ce traitement est de l'ordre de quelques minutes. Un lissage sur une fenêtre d'une heure permet d'améliorer sensiblement la précision des séries obtenues (Manzini, 2020).</p>
PERTURBATIONS DU TRAFIC SUR LES MESURES	Possibles, selon la configuration de l'ouvrage : pour des capteurs à proximité des voies, il peut être nécessaire de mettre en place des supports rigides, voire des amortisseurs.
PERTURBATIONS DE L'ENVIRONNEMENT SUR LES MESURES	<p>Sensibilité aux multi-trajets générés par des obstacles ou des masques du ciel ;</p> <p>Un récepteur peut être perturbé par un champ électro-magnétique proche ;</p> <p>Perturbations possibles avec des précipitations importantes, la présence d'eau stagnante, l'accumulation de neige ;</p> <p>Dans le cadre d'un calcul PPP, besoin de prévoir des modèles adaptés pour la prise en compte des variations atmosphériques ;</p> <p>Dans le cadre d'un calcul relatif, besoin que la référence observe les mêmes effets météo et atmosphériques que les stations de mesure ;</p> <p>Dans le cas d'un chantier comportant de grandes variations d'altitude entre les points suivis (&gt; 100 m), la vapeur d'eau contenue dans les basses couches de l'atmosphère peut biaiser les mesures, notamment sur la composante verticale.</p>
RISQUES POUR LES UTILISATEURS OU LE PUBLIC	Non
ENCOMBREMENT - POIDS	<p>Faible encombrement pour les stations intelligentes, encombrement moyen pour les stations avec antennes séparées (besoin d'installer deux éléments par station, reliés par le câble d'antenne).</p> <p>Pour les stations monofréquence récentes, généralement masse &lt; 1 kg</p>

### AVANTAGES - INCONVÉNIENTS

AVANTAGES	<p>Position obtenue en 3D dans un référentiel global ou local ;</p> <p>Bien adapté aux mesures en continu (surveillance) ;</p> <p>Capteurs autonomes ;</p> <p>Pas de dérive au cours du temps ;</p> <p>Présence d'un réseau de référence en France (RGP) pour rattachement aux systèmes de référence nationaux ;</p> <p>Non destructif ;</p> <p>Les solutions low-cost permettent désormais de disposer d'un nombre important de capteurs et donc de réaliser un meilleur suivi des mouvements de l'ouvrage.</p>
-----------	--

INCONVÉNIENTS	<p>Traitement des données délicat ;</p> <p>Nécessité d’avoir le plus grand angle de ciel visible (élévation de l’horizon idéalement inférieure à 15°) ;</p> <p>Sensibilité à la géométrie environnante ;</p> <p>Précision inférieure à celle des mesures topographiques classiques ;</p> <p>Sensibilité au vandalisme ;</p> <p>Coût du matériel GNSS.</p>
<b>DISPONIBILITÉ - COÛT</b>	
DISPONIBILITÉ	<p>Le matériel « haut de gamme » traditionnel est aujourd’hui (2021) largement accessible auprès des fabricants et de leurs revendeurs.</p> <p>Le matériel « à bas coût » adapté à l’instrumentation des structures est aujourd’hui (2021) moins accessible : seuls quelques fabricants et fournisseurs de services existent en France, généralement hors des grands revendeurs habituels.</p>
COÛT	<p>Il existe une large gamme de matériel GNSS, dont les coûts varient drastiquement selon la performance du matériel (taille et qualité des antennes, échantillonnage), la nature des observations (une ou plusieurs constellations, monofréquence ou multifréquence), la résistance du matériel aux conditions environnementales (protection IP, résistance aux vibrations, aux coupures d’alimentation), et l’intégration ou non de modules embarqués de traitement ou de communication. Les coûts de matériel peuvent varier d’une centaine d’euros (2021) pour une puce monofréquence couplée à une petite antenne patch, à plus d’une dizaine de milliers d’euros pour une station géodésique haute performance.</p> <p>Le coût de mesures de déplacements par GNSS peut être très variable en fonction de l’ouvrage, des objectifs et de la durée des mesures, etc.</p>
<b>RÉFÉRENCES</b>	
NORMES - MODES OPÉRATOIRES - ARTICLES	<p>Benoit, L., Briole, P., Martin, O., Thom, C., 2014. Real-time deformation monitoring by a wireless network of low-cost GPS. J. Appl. Geod. 8, 119-128. <a href="https://doi.org/10.1515/jag-2013-0023">https://doi.org/10.1515/jag-2013-0023</a></p> <p>Manzini N. (2020). Surveillance de santé structurale des ouvrages d’art incluant les systèmes de positionnement par satellites. Thèse de l’Université Paris-Est (thèse Cifre dans le cadre d’une collaboration entre SITES, l’Université Gustave Eiffel, et l’IGN). <a href="https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03236023">https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03236023</a></p> <p>Manzini, N., Orcesi, A., Thom, C., Brossault, M.-A., Botton, S., Ortiz, M. &amp; Dumoulin, J. (2020): Performance analysis of low-cost GNSS stations for structural health monitoring of civil engineering structures, Structure and Infrastructure Engineering. <a href="https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1849320">https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1849320</a></p> <p>Van Nee, R. D. J. (1992). Multipath Effects on GPS Code Phase Measurements. Navigation, 39(2), 177-190. <a href="https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.1992.tb01873.x">https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.1992.tb01873.x</a></p>