

RAPPORT D'ÉTUDE
DRS-18-171751-05464A

12/12/2018

**Dispositif de positionnement satellitaire (GNSS)
pour la surveillance de mouvements de terrain
Présentation et analyses des tests réalisés**

INERIS

*maîtriser le risque |
pour un développement durable |*

Dispositif de positionnement satellitaire (GNSS) pour la surveillance de mouvements de terrain

Présentation et analyses des tests réalisés

Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

PREAMBULE

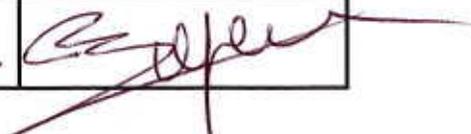
Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'Ineris, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'Ineris ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'Ineris dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'Ineris de par son décret de création, l'Ineris n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'Ineris ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Gaël GOUILLON	Xavier DAUPLEY	Pascal BIGARRE
Qualité	Technicien géologue à l'Unité Risques Géotechniques liés à l'exploitations du sous-sol de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Directeur adjoint des Risques du Sol et du Sous-sol	Directeur des Risques du Sol et du Sous-sol
Visa			

RESUME

Dans le cadre du programme d'appui au Ministère de la Transition écologique et solidaire relatif à la prévention des risques naturels, l'Ineris exerce une veille scientifique vis-à-vis de dispositifs de mesures émergents et novateurs sur le marché.

En 2016 et 2017, l'Ineris a testé un dispositif conçu pour la télésurveillance instrumentale de mouvements de terrain.

Le dispositif se compose d'un réseau de modules GPS, permettant l'acquisition des signaux GNSS, et d'une station de base assurant les calculs des positions et la connexion GSM ou Ethernet. L'ensemble des éléments sont autonomes (alimentés par panneaux solaires). La transmission des données entre les modules GPS et la station de base est assurée par une communication radio.

À comparer aux technologies existantes basées sur la mesure GPS, ce type de dispositif se veut innovant de par son coût très maîtrisé, sa mise en œuvre simplifiée et une précision centimétrique.

Les tests ont été réalisés sur les bordures des effondrements (exploitation de sel) du site de SOLVAY à Cerville et Haraucourt (54). Des modules GPS ont été implantés dans des zones connues comme actives ou considérées comme stabilisées. Un test « forcé et en aveugle » a également été réalisé.

L'objectif de cette instrumentation a été d'évaluer :

- la précision des mesures de position ;
- la mise œuvre du dispositif sur site ;
- la gestion du suivi à distance ;
- la fiabilité des mesures et la robustesse du matériel dans le temps ;
- les limites éventuelles du système.

MOTS-CLES

Versants, mouvements de terrain, surveillance.

TERRITOIRE

CERVILLE/HARAUCOURT, Meurthe-et-Moselle (54), Grand Est, France,
Lat. : 48,664092 - Long. : 6,334889

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENT	7
1. INTRODUCTION	7
2. RAPPELS	7
2.1 Le positionnement satellitaire (GNSS ¹)	7
2.2 Le Logiciel RTKLIB.....	9
3. DISPOSITIF TESTÉ	11
3.1 Présentation	11
3.2 Caractéristiques techniques	12
3.2.1 Module GPS	12
3.2.2 Station de base.....	12
3.3 Fonctionnement	13
3.3.1 Données transmises à la station de base (paramétrage)	14
3.3.2 Données fournies par la station de base (surveillance)	14
3.4 Logiciel de suivi testé	16
3.4.1 Présentation	16
3.4.2 Méthode de calcul de la position médiane.....	18
4. PREMIERE INSTALLATION TEST	19
4.1 Déroulement du test et Objectif.....	19
4.2 Installations réalisées	19
4.3 Résultats	24
5. ANALYSE DES DONNÉES DE POSITION	29
5.1 Analyse globale de la précision des sessions validés	29
5.2 Analyse de la précision des positions en fonction de la configuration des sessions de mesures.....	29
5.3 Analyse de la fiabilité d'exécution des sessions en fonction des configurations demandées	31
6. POINTS PARTICULIERS	33
7. RÉCEPTION e.CENARIS	35
7.1 Installation du dispositif de juin à décembre 2017	35
7.2 Résultats obtenus	37

7.2.1 Glissement du grand compartiment (module GPS3)	37
7.2.2 Variation du niveau du plan d'eau (module GPS5).....	39
8. CONCLUSION.....	41

REMERCIEMENT

L'Ineris remercie la société SOLVAY qui a mis à disposition son site d'exploitation à Haraucourt et Cerville pour mener à bien les travaux décrits dans la suite du rapport.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre d'un programme d'appui pour le bureau national des risques naturels et terrestre (BRNT), l'Ineris exerce une veille scientifique vis-à-vis de dispositifs de mesures émergents et novateurs sur le marché.

Dans la continuité des travaux sur l'UGPS (convention R&D Ineris/Infrasurvey), la société Infrasurvey a développé puis commercialisé un dispositif de mesure de positionnement par satellites (GNSS¹) nommé « GEOMON ». Ce dispositif a été conçu pour la télésurveillance instrumentée de mouvements de terrain.

Ce dispositif a été testé sur le site de SOLVAY à Haraucourt et Cerville. Après un rappel sur le positionnement satellitaire, le dispositif GEOMON est présenté en détail (composants, installation sur site, pilotage). Par la suite, sont exposés : les résultats des différents suivis réalisés, l'analyse des résultats (précision, fiabilité) et la page e-cenaris.

2. RAPPELS

2.1 LE POSITIONNEMENT SATELLITAIRE (GNSS¹)

Un système de positionnement par satellites fournit sur un récepteur les coordonnées géographiques de sa position. Il permet aujourd'hui la « géolocalisation ». Le fonctionnement repose sur la mesure du temps de propagation du signal émis par un satellite jusqu'à sa mesure par un récepteur. La mesure du temps de propagation en provenance de plusieurs satellites permet, par intersection, de déterminer la position (longitude, latitude) et l'altitude du récepteur.

Deux grands modes de positionnement satellitaire (ou GNSS) existent :

- Le positionnement absolu : la position du récepteur est déterminée de manière directe à partir des observations et de la position des satellites, dans le même référentiel.
- Le positionnement relatif ou différentiel : le vecteur séparant le récepteur et une station de référence est estimé. Ce mode est en général plus précis car il supprime les erreurs systématiques à toutes mesures. Il est basé sur le principe que l'imprécision du positionnement satellitaire est semblable dans une même zone et au même moment. Il utilise une (ou plusieurs) station(s) référence qui fournit l'écart entre sa position indiquée par les satellites et sa position réelle connue. Le récepteur, situé à proximité de la station de référence, reçoit alors cet écart et affine en conséquence sa position mesurée par les satellites.

¹ Global Navigation Satellite System

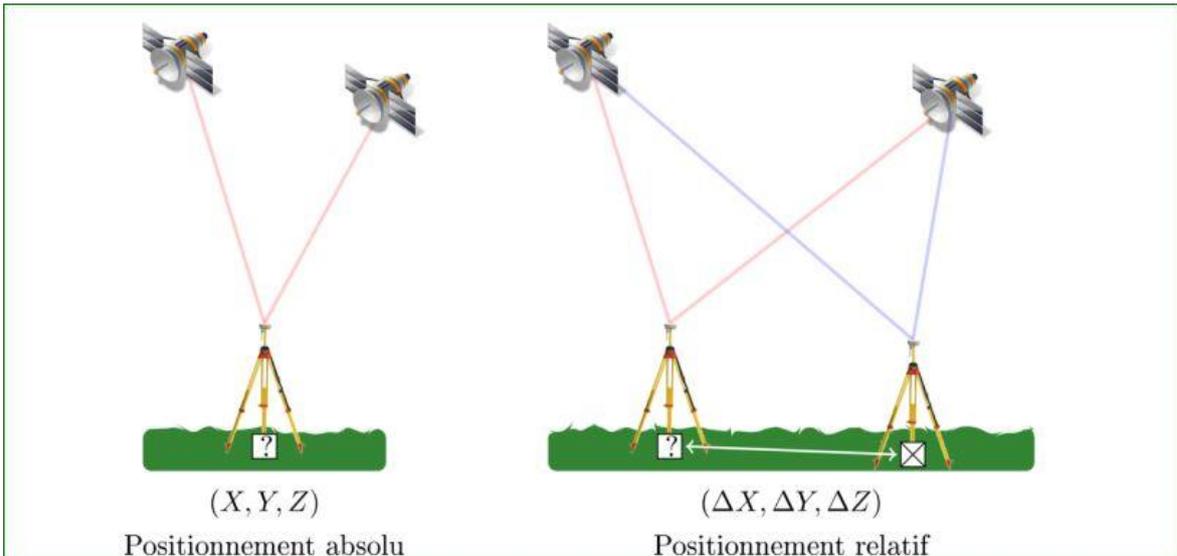


Figure 1 : Principe schématique du positionnement par satellites (mode absolu et différentiel, ENSG©)

A partir de ces deux modes et du type de mesures fait sur les signaux émis par les satellites (code ou phase), différentes méthodes de positionnement ont été développées pour améliorer la précision de la position du récepteur et/ou pour être adaptées à différentes applications. Elles sont synthétisées sur la figure ci-dessous :

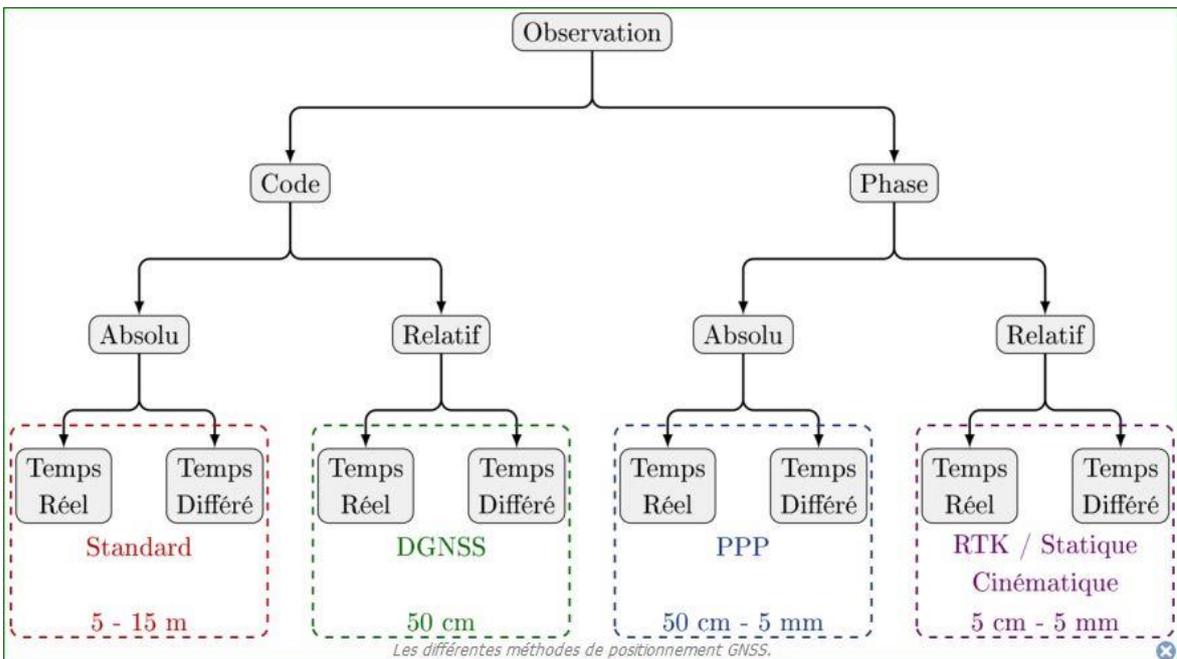


Figure 2 : Les différentes méthodes de positionnement GNSS (ENSG©)

2.2 LE LOGICIEL RTKLIB

RTKLIB est un logiciel open source utilisé pour le positionnement standard et précis de données GNSS. Concrètement, il permet de convertir les signaux (émis par les satellites et réceptionnés par une antenne) en coordonnées géographiques (longitude, latitude, altitude). Au-delà de son libre accès, ce logiciel a comme avantages :

- de traiter simultanément les signaux provenant des principales constellations GPS, GLONASS, Galileo, Beidou, QZSS et SBAS ;
- de prendre en charge diverses méthodes de positionnement GNSS, en temps réel et en temps différé, et sur le code comme sur la phase (Standard, DGNSS, PPP, RTK, etc. voir Figure 2) ;
- de supporter la plupart des formats de données et protocoles GNSS ;
- de donner un accès à de nombreuses bibliothèques de données ;
- d'être utilisable sur différentes interfaces (ordinateur, smartphone, etc.) et de proposer de nombreuses fonctions en lien avec les diverses applications possibles.

Ces caractéristiques font de RTKLIB un logiciel largement utilisé dans de nombreux domaines d'activités et éprouvé depuis 2006.

3. DISPOSITIF TESTÉ

3.1 PRÉSENTATION

GEOMON est une solution innovante pour le suivi de mouvements de terrain par positionnement GNSS.

Le dispositif se compose d'un réseau de modules GPS² (jusqu'à 15), permettant l'acquisition des signaux GNSS, et d'une station de base assurant les calculs des positions et la connexion GSM ou Ethernet.

L'ensemble des éléments sont autonomes (alimentés par panneaux solaires). La transmission des données entre les modules GPS et la station de base est assurée par une communication radio haute performance (communication en champ libre pouvant atteindre 10 km). Néanmoins, pour des mesures précises, il est recommandé d'implanter les modules GPS dans un rayon de 1500 m autour de la station de base.

Le traitement des signaux GNSS est assuré par le logiciel RTKLIB embarqué dans la station de base. L'application d'une correction différentielle nécessite que l'un des modules GPS soit utilisé comme station de référence et positionné dans une zone stable. Les autres modules GPS sont implantés sur des zones où l'on souhaite enregistrer ou surveiller des mouvements.

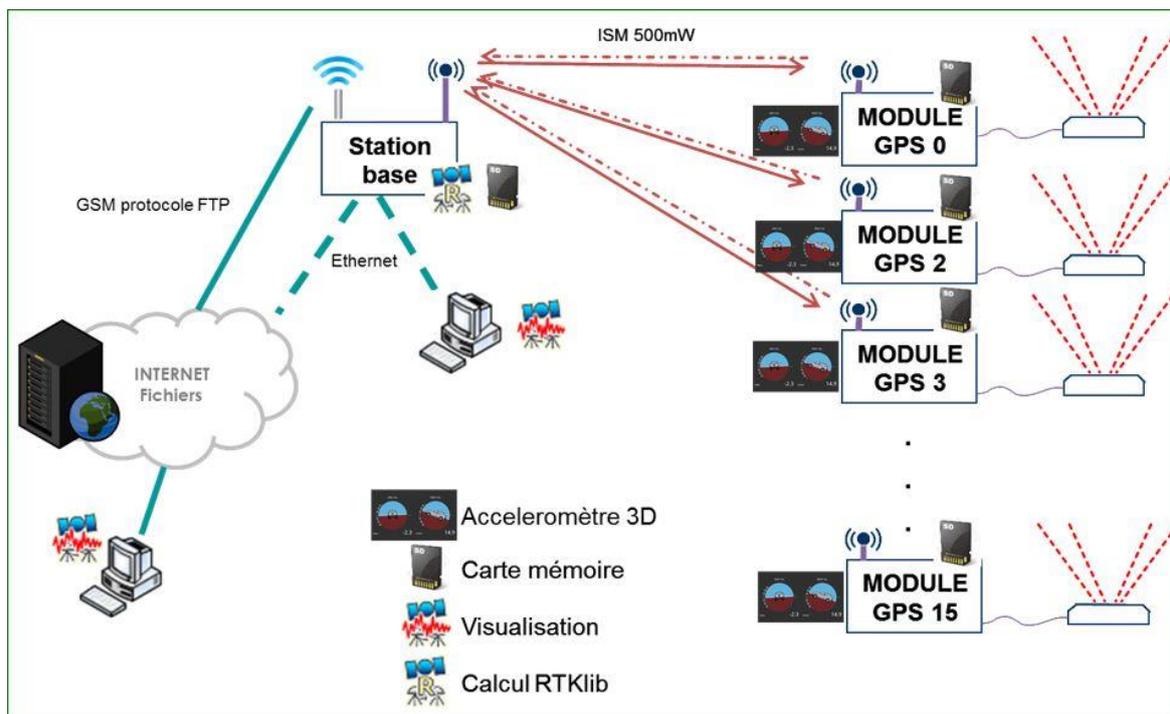


Figure 3 : Principe schématique du fonctionnement du dispositif GEOMON (INFRASURVEY)

² Terme employé par le fabricant. Le mot « GPS » est devenu courant pour désigner un outil permettant la géolocalisation. Une dénomination plus précise serait « module GNSS ».

3.2 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

3.2.1 MODULE GPS

Chaque module GPS se compose de :

- un récepteur GNSS phase L1 de marque NVS (GPS/GLONASS) ;
- un accéléromètre 3D (inclinomètre 2D) ;
- un panneau solaire ;
- un régulateur de charge solaire et un petit accumulateur au plomb 12V 0,8 Ah, suffisant pour une utilisation du dispositif en mode non continu ;
- une antenne radio pour l'envoi des données vers la station de base.

Tous ces composants sont présents sur et dans un boîtier unique étanche et inoxydable (dimensions : 0,25 x 0,15 x 0,1 m). Les caractéristiques des composants permettent un fonctionnement du dispositif de manière autonome en mode non continu. Au besoin (mode continu), une alimentation électrique externe peut être connectée au boîtier.

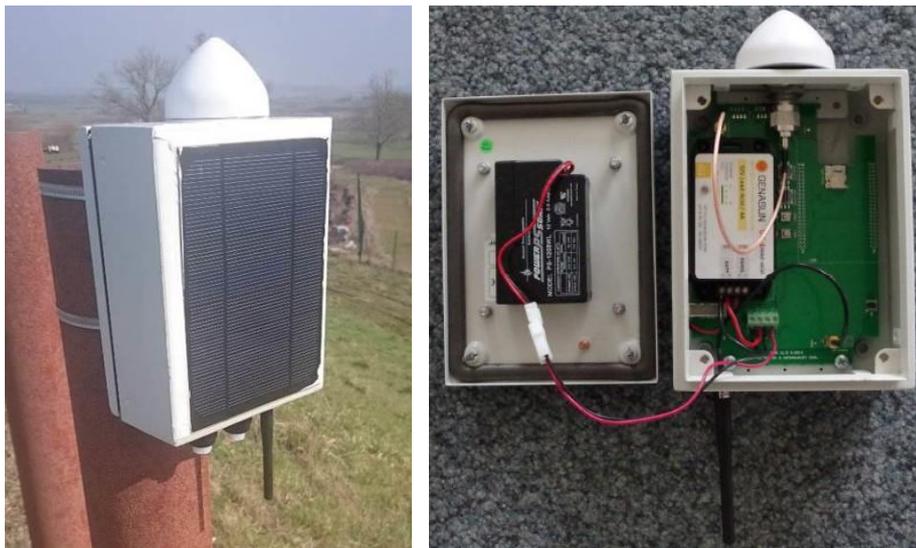


Figure 4 : Vues d'un module GPS

3.2.2 STATION DE BASE

La station de base se compose de :

- une antenne radio (réception des données provenant des modules GPS) ;
- un ordinateur (calcul des positions par RTKLIB, en mode non-continu) ;
- une carte mémoire micro SD (pour enregistrement des données) ;
- une connexion GSM (transfert des données sur un serveur FTP) et une prise Ethernet (transfert filaire) ;
- un panneau solaire (25 watts) externe ;
- un accumulateur.

La station de base correspond à deux boîtiers semblables à celui des modules GPS (un boîtier ne sert que d'accumulateur). Par contre, la station doit être alimentée par un panneau solaire externe de 20 Watts. Elle est aussi conçue pour être branchée directement sur une alimentation électrique conventionnelle.

Remarque : la station de base ne dispose pas de récepteur GNSS, sa position n'est pas mesurée.



Figure 5 : Vues de la station de base

3.3 FONCTIONNEMENT

Remarques préalables : le dispositif testé est dit « ouvert », c'est-à-dire qu'il communique avec des fichiers textes (données décrites par la suite³). Il peut ainsi s'interfacer à d'autres systèmes de mesures. Deux modes de fonctionnement sont possibles, le suivi de position en continu et le suivi de position non continu (ou périodique). Dans le cadre des tests réalisés, seul le mode de suivi non continu a été utilisé. En conséquence, seul le fonctionnement et le paramétrage de ce mode est présenté par la suite.

³ Mise à part les données « brutes » de position (signaux GNSS)

3.3.1 DONNÉES TRANSMISES À LA STATION DE BASE (PARAMÉTRAGE)

En mode non-continu, une session de mesure correspond au moment pendant lequel une mesure de position est effectuée en continu. Un fichier de paramétrage permet de définir la durée d'une session (1) et sa périodicité (2). Ainsi, seules deux valeurs permettent de configurer le dispositif de surveillance. Cette configuration sera appliquée à tous les modules GPS (sessions simultanées). Par exemple, avec les valeurs (1) = 45 min, et (2) = 360 min, chaque module GPS effectuera une session de 45 min toutes les 6 h (soit 4 sessions par 24 h).

D'autres fichiers de paramétrages permettent de définir le module GPS qui servira de référence et l'adresse du serveur FTP sur laquelle les données seront envoyées au terme de chaque session de mesure.

Les fichiers de paramétrage sont transmis à la station, soit par liaison Ethernet lors de la première installation ou d'une intervention sur site, soit à distance, via le serveur FTP et la connexion GSM. L'opérateur en charge de la surveillance a donc la possibilité de modifier la configuration du dispositif sans se déplacer sur le site (augmenter la périodicité d'acquisition par exemple).

```
[GENERAL]
CONTINUOUS_MODE=0

RESET=1
WAKEUP_PERIOD_IN_MINUTES=360

[MEASURE]
SESSION_PERIOD_IN_WAKEUP_PERIOD=1
SESSION_DURATION_IN_MINUTES=45
```

Figure 6 : Aperçu du fichier de paramétrage des sessions de mesure

<pre>[FTP] BASE_URL=51.253.155.168 PORT=17 USERPWD=gps-cerville:UHU_i31s8OP-</pre>	<pre>[GPS_REFERENCE] GPS_MODULE=0 LATITUDE=48.674825 LONGITUDE=6.324772 ALTITUDE=234</pre>
--	--

Figure 7 : Aperçus des fichiers de paramétrage du serveur FTP (à gauche), et du module de référence (à droite)

3.3.2 DONNÉES FOURNIES PAR LA STATION DE BASE (SURVEILLANCE)

Au terme de chaque session de mesure, la station de base transmet au serveur FTP, via la connexion GSM, un répertoire comprenant :

- les données de position calculées par le logiciel RTKLIB (.pos). Le système produit un fichier par module GPS (sauf le module de référence) ;
- les données GNSS brutes (non traitées par RTKLIB). Le système produit un fichier par module GPS (y compris le module de référence) ;

- un fichier d'information « rxinfo » fournissant le niveau de la batterie de la station de base, et pour chaque module GPS (y compris la référence) :
 - l'inclinaison (données X, Y et Z de l'accéléromètre 3D) ;
 - le niveau de la batterie (voltage) ;
 - la qualité de la liaison radio avec la station de base (RSSI⁴).

170629_123448_00016_rxInfo	2 Ko
170629_123448_00016_rxNVS_GPS0	244 Ko
170629_123448_00016_rxNVS_GPS2	248 Ko
170629_123448_00016_rxNVS_GPS2.pos	50 Ko
170629_123448_00016_rxNVS_GPS3	248 Ko
170629_123448_00016_rxNVS_GPS3.pos	50 Ko
170629_123448_00016_rxNVS_GPS5	221 Ko
170629_123448_00016_rxNVS_GPS5.pos	50 Ko

Figure 8 : Vue des fichiers transmis par la station de base au terme d'une session de mesure

```

GEOMON rxInfo : V2.1

BASE NAME      : GM_BASE_0006
MCU_FIRMWARE  : 0x19
BBB_MAC       : 0x544A16F495DA
BBB_VERSION   : GM_BASE_STATION_BBB:1.69
BBB_MD5       : a72739ed09a905dec20d9b1cb3032652
/home/ubuntu/GM_BASE_STATION_BBB
RNX2RTKP_MD5  : e2b03f00274fcdc259c7d57ee3cf3d96
/home/ubuntu/bin/rnx2rtkp
CONVBIN_MD5   : 21674412c75139ca3047e1a5a8170d15
/home/ubuntu/bin/convbin
SD avail.     : 1948512 [MB]
VBat         : 13.7 [V]

GPS_ID        : 2
UNIQUE_ID    : 0x0000
FIRMWARE     : 0x18
VBat         : 13.7 [V]
RSSI         : -71 [dBm]
AccX         : 40
AccY         : -1282
AccZ         : -92
CoordX       : 4193919.044590 [m]
CoordY       : 464747.483717 [m]
CoordZ       : 4767180.197785 [m]
SD avail.    : 0 [MB]

```

Figure 9 : Extrait d'un fichier d'information « rxinfo »

⁴ Received Signal Strength Indication : mesure de la puissance en réception d'un signal reçu d'une antenne (exprimé en dBm, rapport de puissance en décibels entre la puissance mesurée et un milliwatt).

%	GPST	latitude(deg)	longitude(deg)	height(m)	Q	ns	sdn(m)	sde(m)	sdu(m)	sdne(m)	sdeu(m)	sdun(m)	age(s)	ratio
17/07/2017	11:35:10.000	48.677362909	6.323438728	219.8385	2	11	0.6583	0.5435	1.6489	-0.1422	0.3857	0.3526	0.00	1.3
17/07/2017	11:35:20.000	48.677363932	6.323440921	219.8489	2	11	0.4639	0.3863	1.1418	-0.1013	0.2666	0.2297	0.00	1.2
17/07/2017	11:35:30.000	48.677365135	6.323442670	220.1692	2	11	0.3739	0.3155	0.8940	-0.0841	0.2101	0.1626	0.00	1.3
17/07/2017	11:35:40.000	48.677366155	6.323444011	220.5835	2	11	0.3179	0.2727	0.7330	-0.0740	0.1741	0.1126	0.00	1.3
17/07/2017	11:35:50.000	48.677366902	6.323445113	220.9402	2	11	0.2780	0.2433	0.6159	-0.0670	0.1482	0.0687	0.00	1.2
17/07/2017	11:36:00.000	48.677367575	6.323445919	221.2730	2	11	0.2473	0.2213	0.5260	-0.0616	0.1284	0.0074	0.00	1.0
17/07/2017	11:36:10.000	48.677368276	6.323446550	221.4799	2	11	0.2225	0.2040	0.4549	-0.0571	0.1129	-0.0513	0.00	1.2
17/07/2017	11:36:20.000	48.677368880	6.323447074	221.6256	2	11	0.2019	0.1899	0.3975	-0.0532	0.1003	-0.0639	0.00	1.5
17/07/2017	11:36:30.000	48.677369528	6.323447513	221.7551	2	11	0.1844	0.1782	0.3506	-0.0498	0.0900	-0.0692	0.00	2.1
17/07/2017	11:36:40.000	48.677370150	6.323447945	221.9774	2	11	0.1692	0.1680	0.3118	-0.0467	0.0814	-0.0708	0.00	2.8
17/07/2017	11:36:50.000	48.677374765	6.323453141	221.9780	1	10	0.0021	0.0018	0.0057	0.0004	0.0013	0.0011	0.00	4.2
17/07/2017	11:37:00.000	48.677374760	6.323453134	221.9783	1	10	0.0020	0.0017	0.0055	0.0004	0.0012	0.0011	0.00	6.1
17/07/2017	11:37:10.000	48.677374754	6.323453128	221.9782	1	10	0.0019	0.0016	0.0053	0.0004	0.0012	0.0010	0.00	6.6
17/07/2017	11:37:20.000	48.677374748	6.323453123	221.9784	1	10	0.0019	0.0016	0.0051	0.0004	0.0012	0.0010	0.00	7.0
17/07/2017	11:37:30.000	48.677374744	6.323453118	221.9788	1	10	0.0018	0.0015	0.0049	0.0004	0.0011	0.0010	0.00	7.5
17/07/2017	11:37:40.000	48.677374740	6.323453115	221.9792	1	10	0.0017	0.0015	0.0048	0.0003	0.0011	0.0009	0.00	7.9
17/07/2017	11:37:50.000	48.677374737	6.323453115	221.9796	1	10	0.0017	0.0014	0.0046	0.0003	0.0011	0.0009	0.00	8.8
17/07/2017	11:38:00.000	48.677374736	6.323453116	221.9799	1	10	0.0016	0.0014	0.0045	0.0003	0.0011	0.0009	0.00	10.0
17/07/2017	11:38:10.000	48.677374735	6.323453118	221.9803	1	10	0.0016	0.0014	0.0044	0.0003	0.0010	0.0009	0.00	11.5
17/07/2017	11:38:20.000	48.677374734	6.323453118	221.9806	1	10	0.0016	0.0013	0.0043	0.0003	0.0010	0.0008	0.00	12.6
17/07/2017	11:38:30.000	48.677374735	6.323453120	221.9807	1	10	0.0015	0.0013	0.0042	0.0003	0.0010	0.0008	0.00	13.9
17/07/2017	11:38:40.000	48.677374736	6.323453122	221.9807	1	10	0.0015	0.0013	0.0041	0.0003	0.0010	0.0008	0.00	15.5

Figure 10 : Extrait d'un fichier de positions calculées par le logiciel RTKLIB (.pos)

Précisions relatives au fichier de positions calculées par RTKLIB : De manière synthétique, à partir des signaux GNSS réceptionnés, RTKLIB fournit, par période de 10 secondes :

- une coordonnée géographique en longitude / latitude (en degrés) et l'élévation (en mètres) ;
- le nombre de satellites vus
- les paramètres de convergence des satellites ;
- un indice de qualité (Q = 1, 2 ou 5) déterminé à partir des paramètres de convergence. Lorsque Q = 1 (ambiguïté résolue), la convergence est bonne et la précision centimétrique de la position est atteinte. A l'inverse, lorsque Q = 2 ou 5, la convergence est dégradée et la précision n'est plus satisfaisante (>10 cm).

3.4 LOGICIEL DE SUIVI TESTÉ

3.4.1 PRÉSENTATION

Le dispositif testé est fourni avec le logiciel dédié (GEOMON BASIC). Il a pour objectif de permettre la visualisation et l'analyse des sessions de mesures à distance.

Remarque : le logiciel ne traite que les points de mesure (module GPS). Il ne donne aucune indication sur la station de base et le module de référence.

Ce logiciel fonctionne à partir des fichiers de positions calculés par RTKLIB (.pos) et des fichiers d'informations (rxinfo). Il détermine, pour chaque session de mesure (et par module GPS), une valeur de position médiane (x, y, z).

A partir de ces valeurs médianes, le logiciel permet :

- d'afficher et de quantifier des déplacements ;

- de calculer des vitesses d'un mouvement ;
- d'afficher le bruit de la mesure (sur une session et sur une séquence de plusieurs sessions) ;
- d'exporter les résultats d'analyses (format Excel) ;
- de visualiser dans le temps, l'évolution du niveau de la batterie et de l'inclinaison par rapport à la verticale du module GPS.

Les affichages sont réalisés par un graphe par points (1 point = 1 valeur médiane d'une session) et les données (mesures/statistiques) sont présentées dans une colonne sur la même page. L'affichage et les données analysées sont relatifs à une période définie par l'utilisateur. Des caractéristiques relatives à chaque point médian (ou session de mesure) sont également présentées (voir paragraphe suivant).

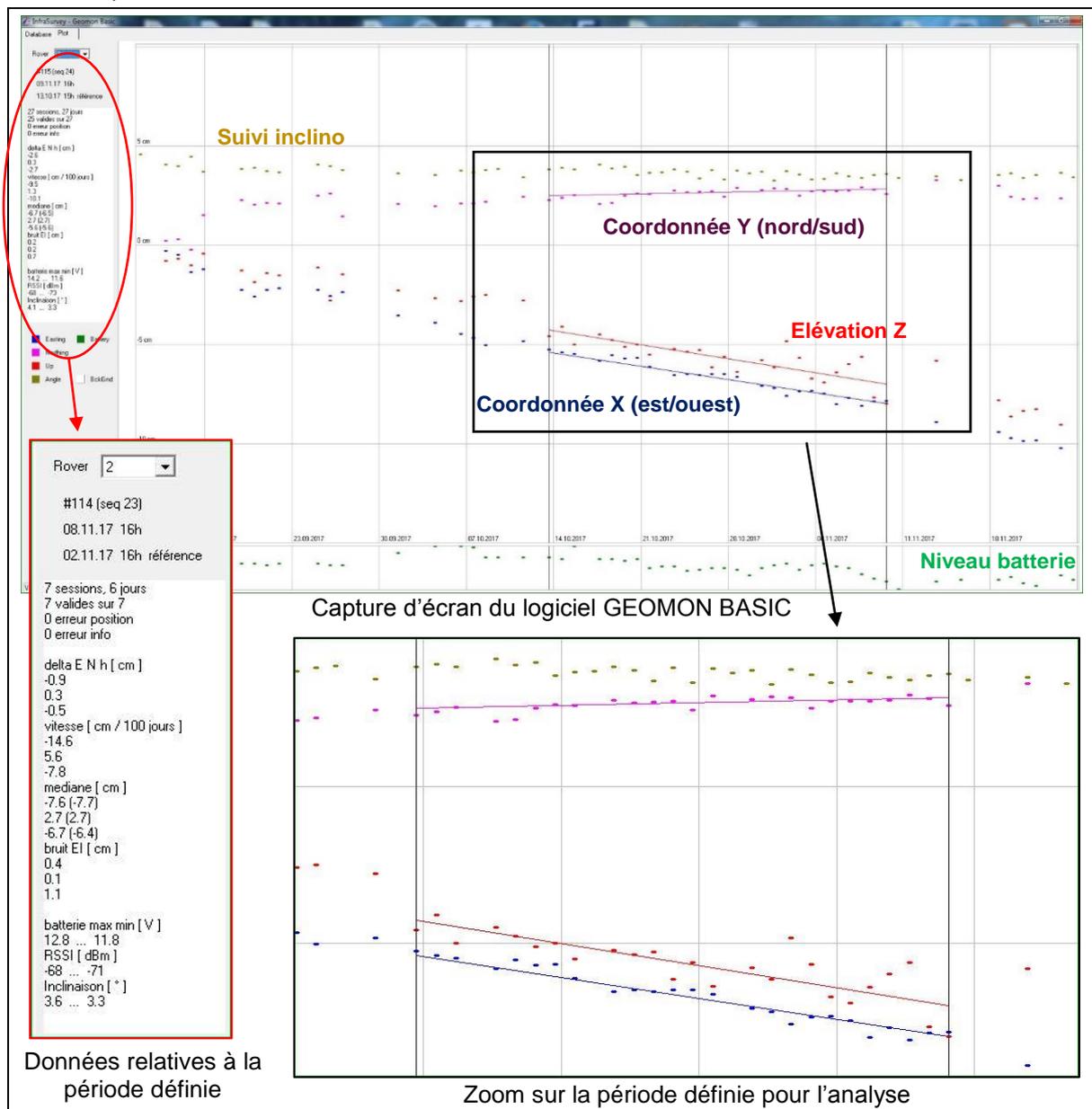


Figure 11 : Aperçu du logiciel GEOMON BASIC (INFRASURVEY)

3.4.2 MÉTHODE DE CALCUL DE LA POSITION MÉDIANE

Avant de calculer la position médiane d'une session de mesure, le logiciel valide (ou non) la session. Pour être validée, une session doit comporter un minimum de 12 mesures avec une bonne convergence ($Q = 1$) et plus de 3 bonnes mesures ($Q = 1$) à la suite. Si la session ne répond pas à cette exigence, elle n'est pas validée et aucune position médiane n'est calculée (aucun point n'apparaît sur le graphe). Lorsqu'une session est validée, toutes les bonnes positions ($Q=1$) sont retenues pour le calcul de la valeur médiane.

Pour chaque session valide, une mesure de dispersion des positions retenues ($Q = 1$) est réalisée. Cette mesure correspond à la détermination de l'écart interquartile pour les 3 directions (x, y, z).

Le logiciel fournit également des informations sur chaque session, à savoir :

- pour les sessions valides : le nombre de bonnes positions ($Q = 1$), le nombre total de positions et le nombre de bonnes positions sans interruption ;
- pour les sessions non valides : le message « erreur convergence » si les critères de validation ne sont pas atteints ; les messages « erreur position » si le fichier de position (.pos) n'a pas été transmis par la station de base.

4. PREMIERE INSTALLATION TEST

4.1 DÉROULEMENT DU TEST ET OBJECTIF

Le dispositif de test a été installé pour la première fois le 11 mars 2016 sur un site de SOLVAY à Haraucourt et Cerville (Meurthe-et-Moselle). La mise en place du dispositif et le démarrage du suivi ont été réalisés ce même jour. Le dispositif est resté en place et a été suivi à distance jusqu'au 27 octobre 2016.

L'objectif de cette instrumentation est d'évaluer :

- la précision des mesures de positions ;
- la mise œuvre du dispositif sur site ;
- la gestion du suivi à distance ;
- la fiabilité des mesures et la robustesse du matériel dans le temps ;
- les limites du système.

4.2 INSTALLATIONS RÉALISÉES

- **Station de base et module de référence**

La station de base et le module de référence ont été installés sur une digue située à proximité des bureaux de l'exploitant. Le principal avantage de cet emplacement réside dans sa situation au sommet d'une colline offrant un champ de vision panoramique idéal pour la communication avec les modules GPS. Sa situation au sein d'une enceinte clôturée assure également une sécurité vis-à-vis du vandalisme.

Cette digue est édifiée depuis plus de 15 ans et elle n'est sujette à aucun mouvements résiduels (tassement, glissement). Il s'agit donc d'une implantation acceptable pour le module de référence (qui ne doit jamais bouger pour assurer une mesure précise des modules GPS).



Figure 12 : Vues de la station de base (à gauche) et du module de référence (à droite)

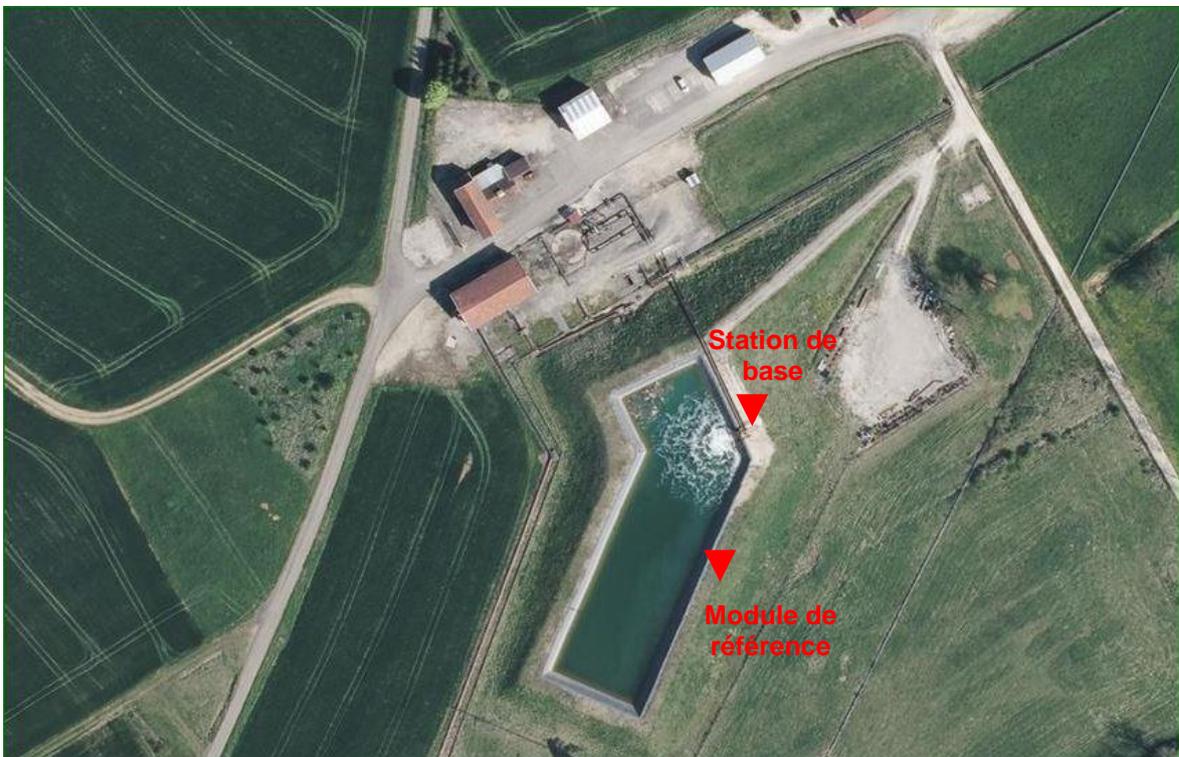


Figure 13 : Situation de la station de base et du module de référence (vue aérienne, www.geoportail.fr)

- **GPS2 - Haraucourt**

Le module GPS2 a été installé sur le talus d'un ancien effondrement et dans une zone de glissements de terrain considérée peu active depuis plusieurs années.

L'objectif de cette surveillance est d'observer cette zone potentiellement sujette à des mouvements.

Après s'être assuré de la vue en champ libre de la station de base, située à 1,3 km, le module a été installé sur une tige métallique reposant sur un socle massif posé à même le sol (Figure 15). Le boîtier se trouve à environ 1 m de hauteur et son panneau solaire a été orienté vers le sud.

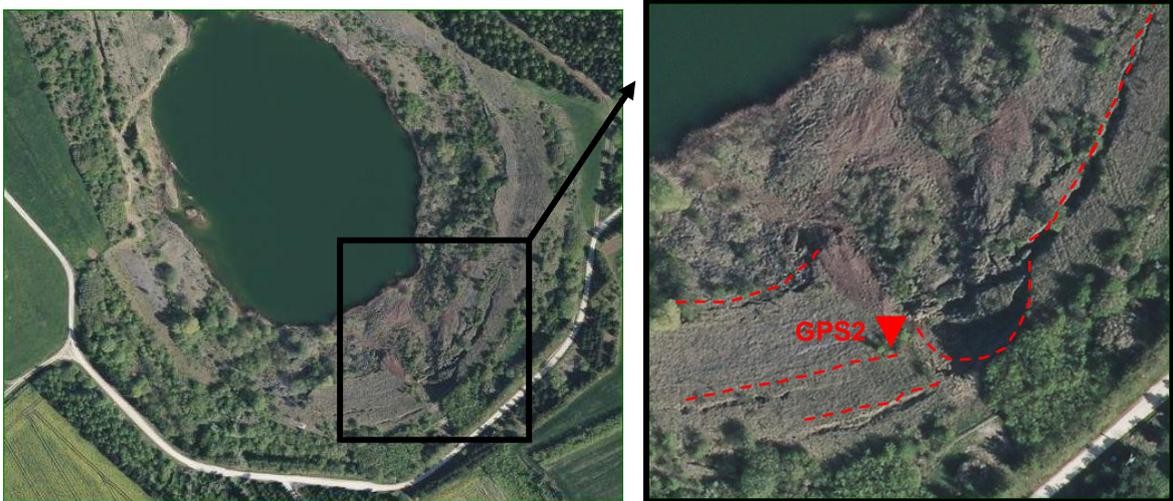


Figure 14 : Situation du module GPS2 (vue aérienne, www.geoportail.fr)



Figure 15 : Aperçus photos de l'implantation du module GPS2

- **GPS3 - Cerville**

Le module GPS3 a été installé en bordure de l'effondrement de Cerville. Cet effondrement (février 2009) présente des fronts subverticaux relativement instables et des phénomènes de glissement étagés sont visibles en différents points. La zone où est implanté le module est clairement identifiée comme « active ». Afin d'être certain de mesurer un mouvement, le module a été placé immédiatement en aval d'une fracture ouverte présentant des signes d'activités récentes (Figure 17).

L'objectif de cette surveillance est de valider l'état « actif » du glissement et de suivre son évolution.

Après s'être assuré de la vue en champ libre de la station de base, située à 1,7 km, le module a été installé sur une tige métallique reposant sur un socle massif posé à même le sol. Le boîtier se trouve à environ 1 m de hauteur et son panneau solaire a été orienté vers le sud.



Figure 16 : Situation du module GPS3 (vue aérienne, www.geoportail.fr)



Figure 17 : Aperçus photos de l'implantation du module GPS3

- **GPS5 - Test en aveugle**

Le module GPS5 a été installé sur une tête de sondage à environ 120 m de la station de base. Le module est fixé par des colliers de serrage à l'extrémité d'une tige filetée, elle-même vissée à l'autre extrémité sur la tête de sondage. Ainsi, en vissant la tige sur la tête de sondage, la hauteur du module peut être modifiée précisément (au centimètre près).

L'objectif de cette installation est d'observer la précision des mesures d'élévation, mesures a priori deux fois moins précises que celles réalisées en plan (x/y).

Durant toute la période du test, l'exploitant a fait varier la hauteur du module en relevant à chaque fois la date, l'heure, l'amplitude (cm) et le sens du mouvement opéré. Ces mouvements ont été effectués sans avertir l'opérateur qui surveille le dispositif à distance.

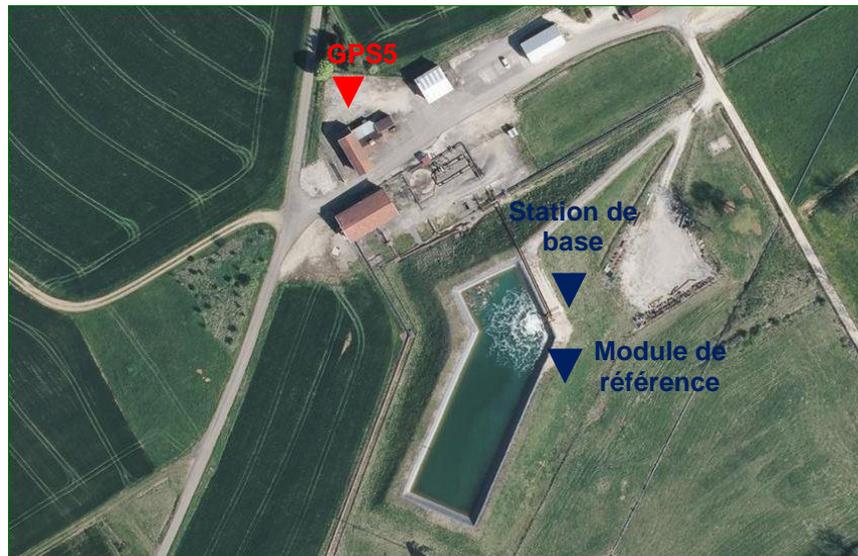


Figure 18 : Situation du module GPS5 (vue aérienne, www.geoportail.fr)



Figure 19 : Aperçus photos de l'implantation « test » du module GPS5 (à droite, principe schématique du test en coupe)

- **Synthèse de l'installation**

Au terme de la journée du 11 mars 2016, tous les éléments du dispositif ont été installés. La surveillance, par positionnement satellitaire, des modules GPS2, 3 et 5 a été activée le même au jour. L'image aérienne suivante représente l'ensemble du dispositif mis en place :



Figure 20 : Vue d'ensemble du dispositif testé

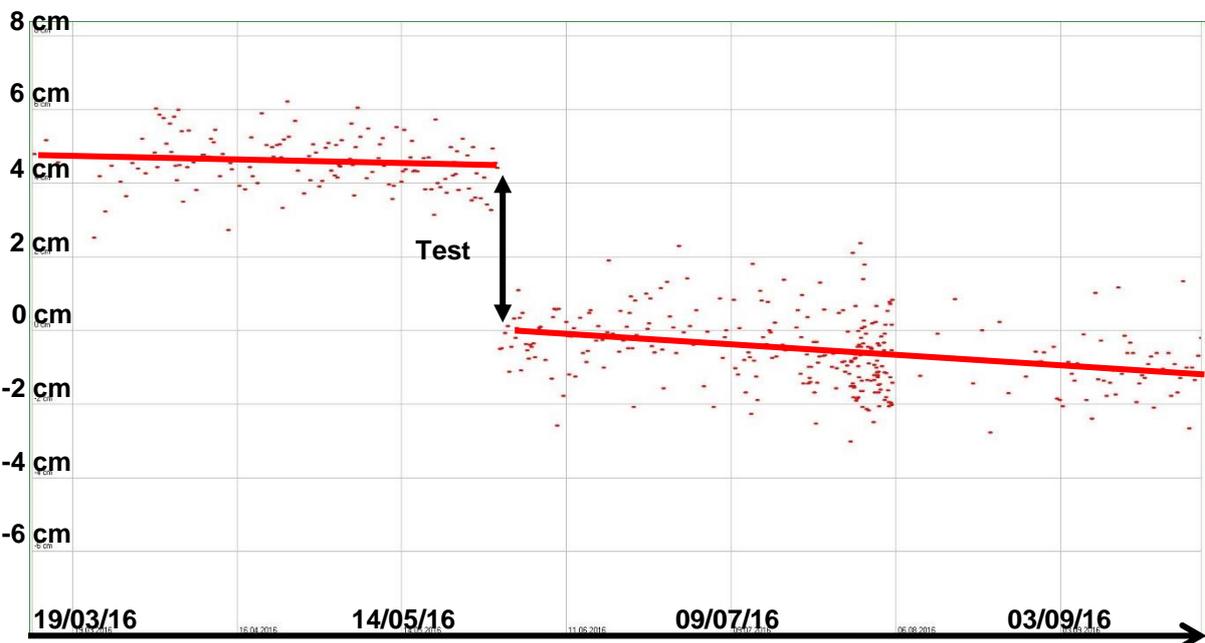
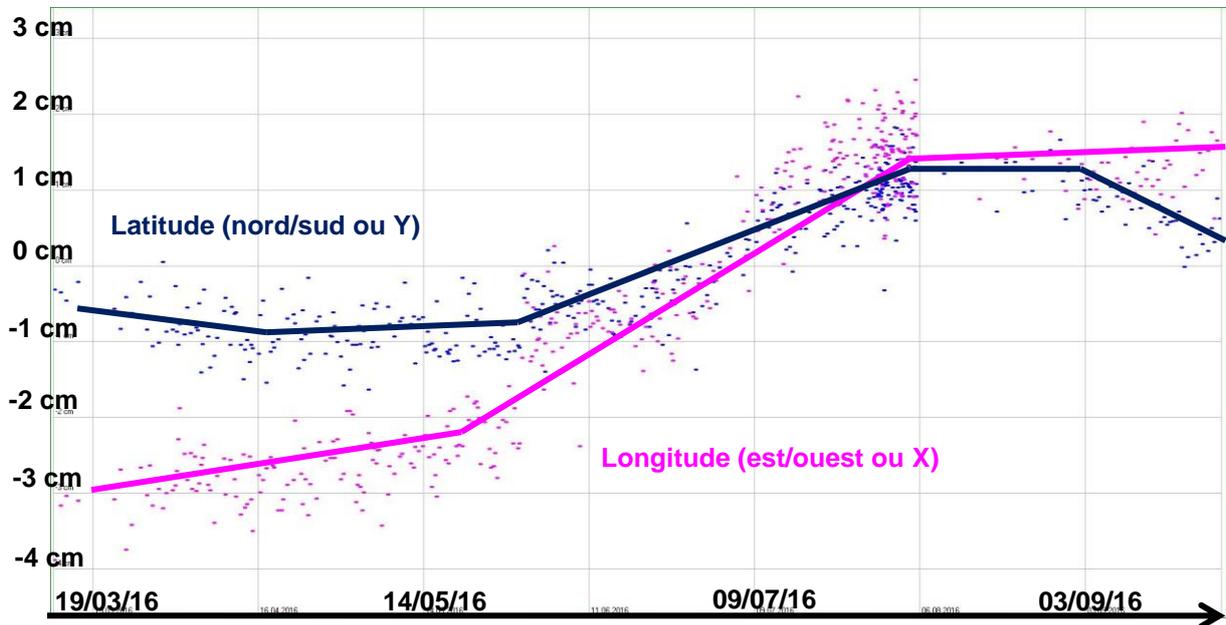
4.3 RÉSULTATS

➤ **GPS2 - Bordure sud de l'effondrement de Haraucourt**

Le suivi du module GPS2 s'est déroulé sur 196 jours consécutifs. Sur cette période, 686 sessions de mesure ont été faites, elles ont permis de relever :

- un déplacement horizontal de 5 cm (soit 0,25 mm/jr) dirigé vers le nord-nord-est ;
- un déplacement vertical inférieur à 2 cm. Cette valeur est plus incertaine à cause d'un test réalisé (voir par la suite) et de l'imprécision sur la mesure de l'élévation (voir par la suite) ;
- le mouvement enregistré est cohérent avec la situation du glissement. Le talus est orienté est/ouest et penté vers le nord, d'où la principale composante du déplacement vers le nord (+4,5 cm). La présence d'une importante loupe glissement quelques mètres à l'est du module peut également expliquer la légère composante est du mouvement enregistré (+1 à 2 cm).

Le suivi de la bordure sud de cet effondrement a mis en évidence que la zone n'est pas totalement stabilisée. De très faibles mouvements, imperceptibles à l'observation sur site, sont encore présents.



Remarque : lors d'une intervention sur le site le 30/05/2016, le module GPS2 a été descendu d'environ⁵ 5 cm (même opération que pour le module GPS5). La variation de l'élévation mesurée par le dispositif est de 4,5 cm et correspond donc, à un centimètre près, au déplacement réel opéré.

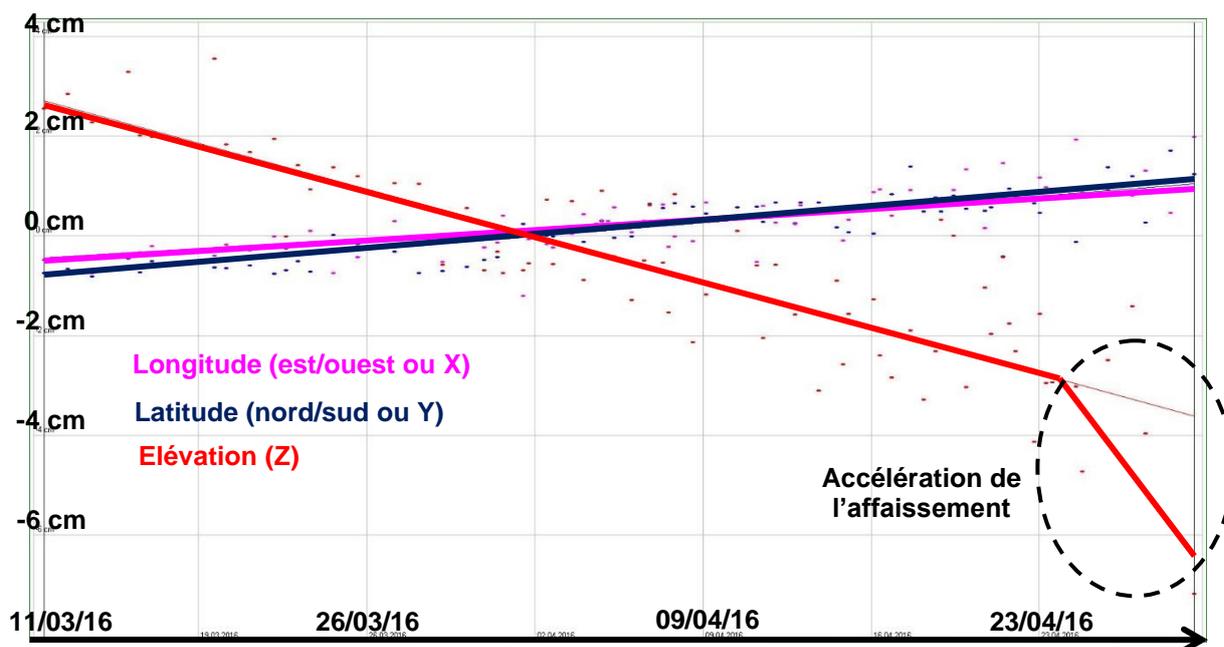
⁵ Déplacement mesuré sur site avec une précision centimétrique.

➤ GPS3 – Bordure sud de l’effondrement de Cerville

Le suivi du module GPS3 s’est déroulé sur 48 jours consécutifs. Etant donné la situation du module et le risque de perte du matériel, il a par la suite été déplacé (voir détail ci-dessous). Le suivi s’est ensuite poursuivi 16 jours avant d’être interrompu (défaut du module GPS).

Sur les 48 premiers jours du suivi, 156 sessions de mesure ont été faites, elles ont permis de relever :

- un déplacement horizontal linéaire de 2,5 cm (soit 0,52 mm/jr) dirigé vers le nord-est ;
- un déplacement vertical de 9,3 cm avec une accélération significative (x5) les 5 derniers jours. Le déplacement est linéaire les 43 premiers jours avec une vitesse de 1,3 mm/jr. Les 5 derniers jours, la vitesse est passée à 7 mm/jr ;
- le mouvement enregistré est cohérent avec la situation du glissement (talus orienté est/ouest et penté vers le nord). Etant donné la valeur des déplacements, les mouvements sont visibles sur le site, notamment au niveau de la principale fracture (Figure 25).



Etant donné l’accélération significative du phénomène d’affaissement, un effondrement brutal du compartiment est apparu possible (engendrant la perte du module). En conséquence, le module a rapidement été déplacé de quelques mètres en amont de la fracture active.

Le 29/04/2016, le changement d'emplacement du module a été enregistré, le déplacement est de 2,37 m vers le sud et 2,11 m vers l'ouest. La variation de l'élévation est de + 54 cm, cette valeur correspond à l'amplitude de l'affaissement du compartiment en train de glisser.

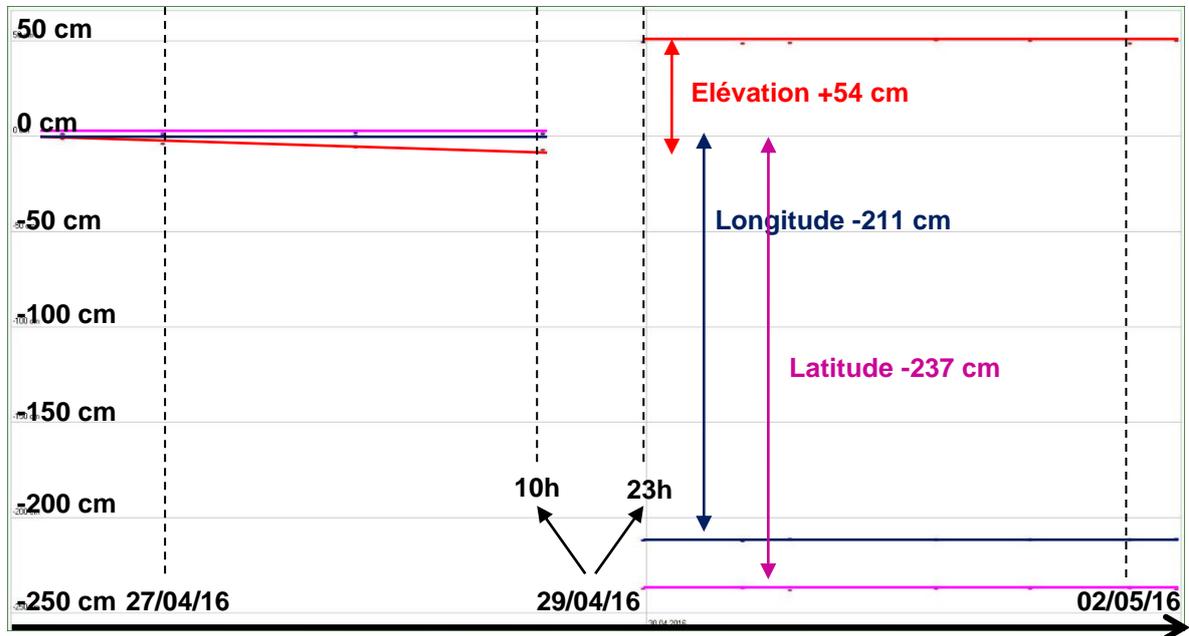


Figure 24 : Variation des trois composantes de la position du module GPS3 à la suite de son changement d'emplacement



Figure 25 : Vues de la nouvelle implantation du module GPS3

A ce nouvel emplacement, le suivi a duré 16 jours consécutifs. La dernière position précise fournie par le dispositif date du 16/05/2016. Au-delà de cette date, le module n'a plus assuré le suivi (puce GNSS défectueuse et hors service). Durant les 16 jours de suivi, les sessions de mesure réalisées n'ont relevé aucun mouvement.

➤ **GPS5 – Test en aveugle**

A chaque mouvement détecté à distance, l'opérateur a signalé et communiqué la valeur enregistrée par le dispositif testé. Au terme du test, les mesures « réelles » et « enregistrées » ont été croisées (Figure 26). Sur site, la valeur du déplacement a été mesurée au millimètre près.

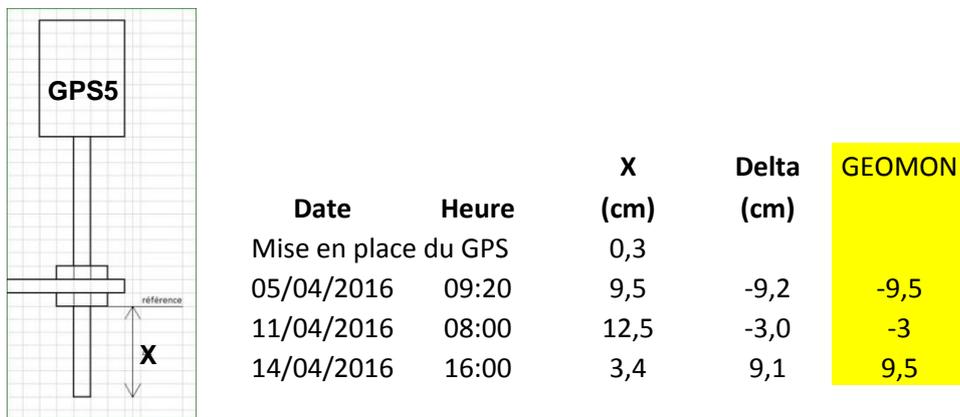


Figure 26 : Tableau des déplacements réels et mesurés, sur l'élévation du module GPS5



Figure 27 : Vue des déplacements enregistrés sur l'élévation du module GPS5

5. ANALYSE DES DONNÉES DE POSITION

5.1 ANALYSE GLOBALE DE LA PRÉCISION DES SESSIONS VALIDÉS

L'analyse a consisté à relever, pour les modules GPS 2 et 3, la valeur du bruit sur l'ensemble de la période du suivi, soit 200 jours consécutifs pour le GPS2 et 48 jours pour le GPS3.

Pour rappel, le bruit est une mesure de dispersion des positions retenues ($Q = 1$) sur une session valide. Cette mesure correspond à la détermination de l'écart interquartile pour les 3 directions (x, y, z).

Les sessions valides qui ont abouti à des positions erronées (précision >10 cm) ont également été comptabilisées et analysées.

N°Module	Moyenne bruit (cm) sur sessions validées			Sessions valides aboutissant à une position erronée	
	x	y	z	Nombre	Analyse
GPS2 (200jours)	0,7	0,9	2	5 sur 458 (1%)	Les 5 sessions présentent des mesures de bruits importantes (largement supérieures aux moyennes) et un nombre de bonnes positions $Q=1$ inférieur à 15.
GPS3 (48jours)	0,4	0,4	1,2	0 sur 77	

Figure 28 : Tableau d'analyse de la précision des mesures

Il ressort de cette analyse que :

- le bruit est inférieur à 1 cm sur la mesure de position en plan (x, y) et de 1 à 2 cm sur la mesure de l'élévation. Les précisions observées correspondent à celles annoncées, et comme attendu, la précision est meilleure en plan que sur l'élévation (x2) ;
- les sessions valides aboutissant à des positions erronées (ou imprécises) sont rares ($\leq 1\%$). Ces sessions ont la particularité de présenter un très faible nombre de bonne position ($Q = 1$).

Remarque : Cette même analyse n'a pas été retenue sur le GPS5. En effet, les tests effectués sur le GPS5 (variations répétées de déplacements centimétriques sans continuité⁶) faussent la mesure et l'estimation de la mesure du bruit.

5.2 ANALYSE DE LA PRÉCISION DES POSITIONS EN FONCTION DE LA CONFIGURATION DES SESSIONS DE MESURES

Durant cette première phase de test, plusieurs configurations de session (durée mesure + périodicité) ont été appliquées au dispositif. Le principal objectif de cette analyse est d'observer d'éventuelles variations de la précision (bruit de mesure) en fonction de la durée des sessions de mesure.

⁶ Les déplacements ont successivement été pris en élévation et en abaissement.

Afin de ne pas biaiser cette analyse, toutes les observations ont été réalisées sur des séquences où les modules étaient fixes (aucun déplacement).

Pour obtenir un échantillon de session suffisant (>24), la longueur des séquences (nombre de jours) a été adaptée en fonction de la périodicité déterminée par les configurations.

Cette analyse a été faite simultanément sur les modules GPS2 et GPS5.

Configuration session + long. séquence analysée	10min/1h sur 3 jours	30min/3h sur 3 jours	45min/6h sur 10 jours	60min/12h sur 15 jours	180min/12 h sur 15 jours
Bruit GPS2 (x / y / z) (Distance de la référence : 1.3 km)	0.5/0.3/1.2	0.4/0.3/0.7	0.4/0.6/0.9	0.4/0.3/0.9	0.3/0.4/0.8
Bruit GPS5 (x / y / z) (Distance de la référence : 120 m)	0.5/0.6/0.9	0.4/0.6/1.3	0.3/0.4/1.4	0.3/0.3/0.7	0.3/0.6/1.1

Tableau 1 : Variation du bruit de mesure en fonction de la durée des sessions

Il ressort de cette analyse que :

- la durée de la session de mesure, de 10 à 180 min, n'apporte pas de précision supplémentaire ;
- le facteur 2, entre le bruit de mesure des directions x/y et z est systématiquement observé ;
- le bruit de mesure est inférieur à 5 mm dans les directions x et y (position en plan) et de l'ordre de 1 cm dans la direction z (élévation) ;
- la distance entre le module de référence et le module GPS n'influence pas la précision de la position (bruit de mesure semblable entre 120 m et 1,3 km de distance).

5.3 ANALYSE DE LA FIABILITÉ D'EXÉCUTION DES SESSIONS EN FONCTION DES CONFIGURATIONS DEMANDÉES

Cette analyse a consisté à observer le nombre de sessions valides et d'erreurs en fonction des configurations appliquées au dispositif (durée mesure + périodicité).

Tout comme pour l'analyse précédente, cette observation a été faite simultanément sur les modules GPS2 et GPS5.

Durée session / long. séquence	Module GPS	Nombre de sessions totales	Nombre de sessions valides	Nombre de sessions invalides ⁷	Erreurs ⁸	Taux de réussite (valides/ totales)	Commentaires	
10 min / 7 jours	GPS2	136	89	47	0	65%	Les sessions invalides sont liées au temps de mesure court (positions Q=1 faibles).	
	GPS5	136	85	51	0	62,5%		
30 min / 9 jours	GPS2	51	35	16	0	69%		
	GPS5	51	39	12	0	76,5%		
45 min / 90 jours	GPS2	310	213	92	5	69%		Erreur = test matériel
	GPS5	310	219	86	5	70,5%		
60 min / 15 jours	GPS2	29	13	9	7	45%	Erreur = Batterie défectueuse	
	GPS5	29	24	5	0	82%		
180 min / 28 jours	GPS2	55	53	2	0	96%		
	GPS5	55	52	3	0	94,5%		

Tableau 2 : Analyse du taux de sessions valides en fonction de la durée des sessions

Il ressort de cette analyse que :

- plus la durée de session augmente, plus la probabilité qu'elle soit validée augmente ;
- sur une même session, le taux de validation (hormis erreur) est semblable sur l'ensemble des points de mesures (qualité des signaux GNSS irradiant le site à un moment donné) ;
- la distance entre le module de référence et le module GPS, et l'environnement des modules (1 en raz campagne, 1 en bordure bâti) n'ont pas d'influence ;

⁷ Session invalide : mesure réalisée et position médiane non retenue car moins 15 positions avec Q=1 et/ou pas 3 positions Q=1 consécutive.

⁸ Erreur : le dispositif n'a pas émis de fichiers de position (problème GPS, radio, GSM, etc.).

6. POINTS PARTICULIERS

➤ **Analyse des mesures inclinométriques**

Ce paramètre sert principalement à vérifier la verticalité du support. Si ce dernier s'incline fortement (à la suite du glissement ou par exemple à de fortes rafales de vent), la mesure de position faite par le module GPS sera d'une part dégradée (exposition face au ciel) et d'autre part, le déplacement enregistré ne correspondra plus exactement à celui du mouvement de terrain.

Lors des tests réalisés, aucune inclinaison significative n'a été mesurée.

➤ **Défauts matériels recensés**

L'installation du dispositif et les tests réalisés se sont déroulés sur les 18 mois consécutifs. Sur cette période, trois « pannes matériel » sont survenues, à savoir :

- 2 batteries de modules GPS hors services ;
- 1 puce GPS hors services.

Ces pannes ont engendré la suspension des mesures sur les modules concernés et une intervention sur site pour changer les batteries ou le module GPS.

➤ **Tests autonomie et reboot**

Le dispositif a été testé durant 18 mois consécutifs sans aucune alimentation extérieure. L'autonomie pour 1h de mesures cumulées par 24h est largement assurée. En fonction de la saison et de l'ensoleillement, jusqu'à 8-10h de mesures cumulées par 24h ont été réalisées.

Le dispositif a été poussé largement au-delà des limites recommandées, jusqu'au reboot. Lorsque le niveau de batterie du module GPS est insuffisant, la mesure est défectueuse (erreur) et aucune position n'est calculée. Une nouvelle mesure est automatiquement lancée une fois que la charge de la batterie le permet et le dispositif reprend sa routine avec la même configuration (durée de la mesure + périodicité).

➤ **Augmentation de la précision (< 0,5 cm)**

Le nombre de mesures valides ($Q = 1$) successives influence directement la précision. Au-delà de 30, 50, voire 100 mesures $Q=1$ consécutives, la mesure du bruit semble être inférieure à 5 mm dans les directions x et y, et inférieure à 1 cm dans la direction z. Ainsi, en appliquant une méthode de calcul de la position médiane plus exigeante, la précision des positions mesurées peut être améliorée.

En contrepartie, il est recommandé d'allonger la durée des sessions de mesure (1h30 au lieu de 30 ou 45 min par exemple) et si possible de bénéficier d'une source d'alimentation électrique pour les modules GPS afin d'assurer l'autonomie du système, notamment lors des sessions nocturnes.

Remarque : au final, la précision du dispositif reste fortement dépendante des conditions environnementales du site (obstructions et effets multi-trajets principalement). Ces conditions peuvent être estimées avant une installation ou par la réalisation de « pré-mesures ».

7. RÉCEPTION e.CENARIS

e.Cenaris est l'infrastructure de l'Ineris dédiée à l'observation et à la surveillance des risques du sol et du sous-sol.

Une page de l'infrastructure a été créée pour réceptionner et afficher les mesures réalisées par le dispositif testé.

De nouvelles mesures réalisées durant la dernière phase de test, de juin à décembre 2017, sont exposées et illustrées par la suite à partir de graphes issus de la page e. Cenaris.

7.1 INSTALLATION DU DISPOSITIF DE JUIN À DÉCEMBRE 2017

Le 15 juin 2017, tous les éléments du dispositif ont été installés autour de l'effondrement de Cerville. L'image aérienne suivante (Figure 29) représente l'ensemble du dispositif mis en place :



Figure 29 : Vue d'ensemble du dispositif installé le 15 juin 2017

De manière détaillée, les caractéristiques et objectifs de cette installation sont décrits par la suite :

- La station de base et le module de référence sont implantés sur un même mat situé dans une zone « stable » à 200 m au sud-est du cratère d'effondrement (Figure 30). Depuis ce point, les 3 modules GPS sont visibles en champs libre et situés à environ 350 m de distance.

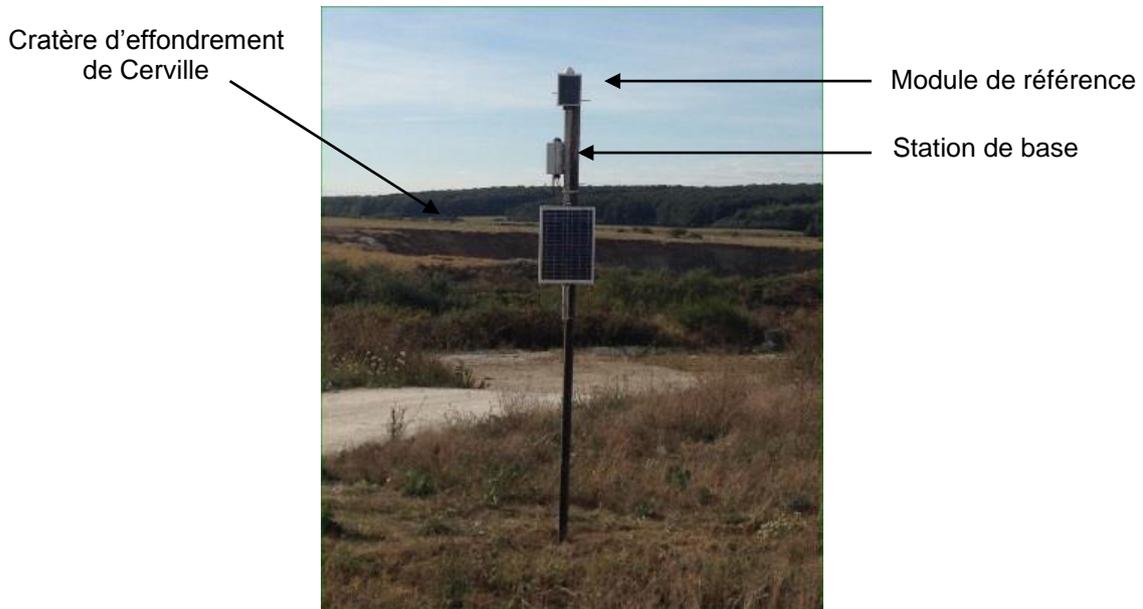


Figure 30 : Aperçu photo de la station de base et du module de référence

- Les modules GPS 2 et 3 sont situés en bordure « est » de l'effondrement, sur un grand compartiment présentant des indices significatifs de glissement (Figure 31). L'objectif est de caractériser le déplacement (direction, vitesse, etc.). Etant donné la taille du compartiment (+/- 200 m x 40 m), 2 modules ont été implantés à une quinzaine de mètres de distance. La mesure sera ainsi doublée et un éventuel basculement (ou une dislocation en plusieurs parties) du compartiment pourra être détectée.

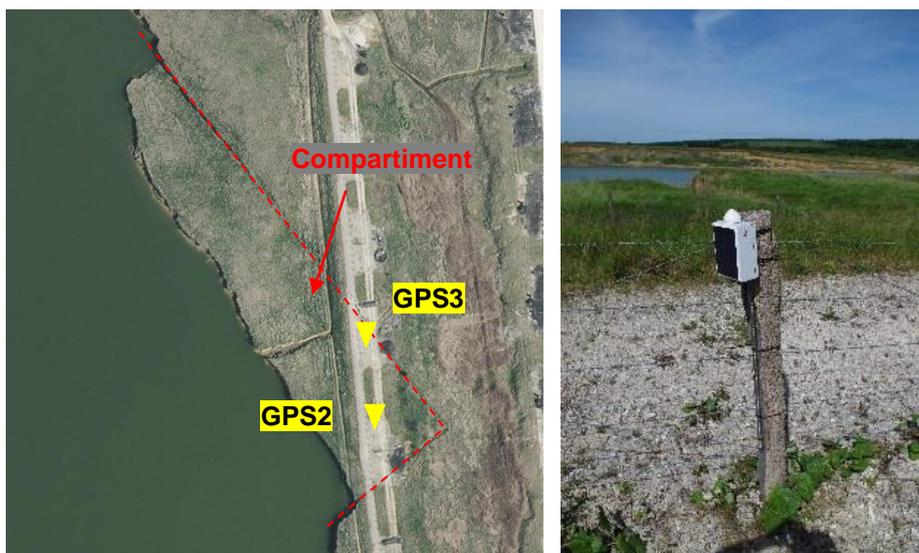


Figure 31 : Situation des modules GPS2 et 3 et aperçu photo du module GPS2

- Le module GPS5 a été fixé sur un flotteur et positionné au centre du plan d'eau (Figure 32). Il est maintenu par un câble afin qu'il ne dérive et ne s'échoue sur un rivage. L'objectif est d'enregistrer les variations du niveau de l'eau.



Figure 32 : Aperçus photos du flotteur et de la position du module GPS5

7.2 RÉSULTATS OBTENUS

Le dispositif a été paramétré pour réaliser une mesure continue de 1h toutes les 24h. Les trois modules GPS (2, 3 et 5) ont été suivi durant 185 jours. Une période de 13 jours (du 27 juillet au 10 août 2017) n'a pas été suivie en raison d'une défaillance de la puce GPS du module de référence (module remplacé sur site). Début décembre 2017, les conditions climatiques exceptionnelles (pluie, tempêtes, brouillard) ont également engendrée des mesures dégradées n'atteignant pas la précision centimétrique attendue (positions non retenues).

Dans l'ensemble, cette installation a tout de même permis de surveiller avec précision l'évolution du glissement du grand compartiment et les variations du niveau du plan d'eau.

Les différents graphes et tableaux de données exposés par la suite sont issus de la page e.Cenaris. Ils ont permis le suivi à distance et en quasi temps-réel du dispositif ainsi que les analyses présentées par la suite.

7.2.1 GLISSEMENT DU GRAND COMPARTIMENT (MODULE GPS3)

L'analyse des données a permis de relever (du 15/06/17 au 01/12/17) :

- le compartiment a glissé de 18 cm vers l'ouest, 3,5 cm vers le sud et il s'est affaissé de 22 cm (Figure 33), soit un déplacement horizontal de 18 cm vers la direction ouest-sud-ouest (Figure 35) et un déplacement total de 28,7 cm ;
- le glissement présente un déplacement linéaire avec une vitesse moyenne de 1,7 mm par jour (Figure 33) ;
- les positions mesurées ont une précision infracentimétrique en plan et comprise entre 1 et 2 cm en élévation (Figure 34) ;

- la pente du glissement est à 45°, logiquement dirigée vers le cratère d'effondrement ;
- les mesures enregistrées sur les modules GPS2 et 3 sont très proches, aucun phénomène de basculement n'est décelé.

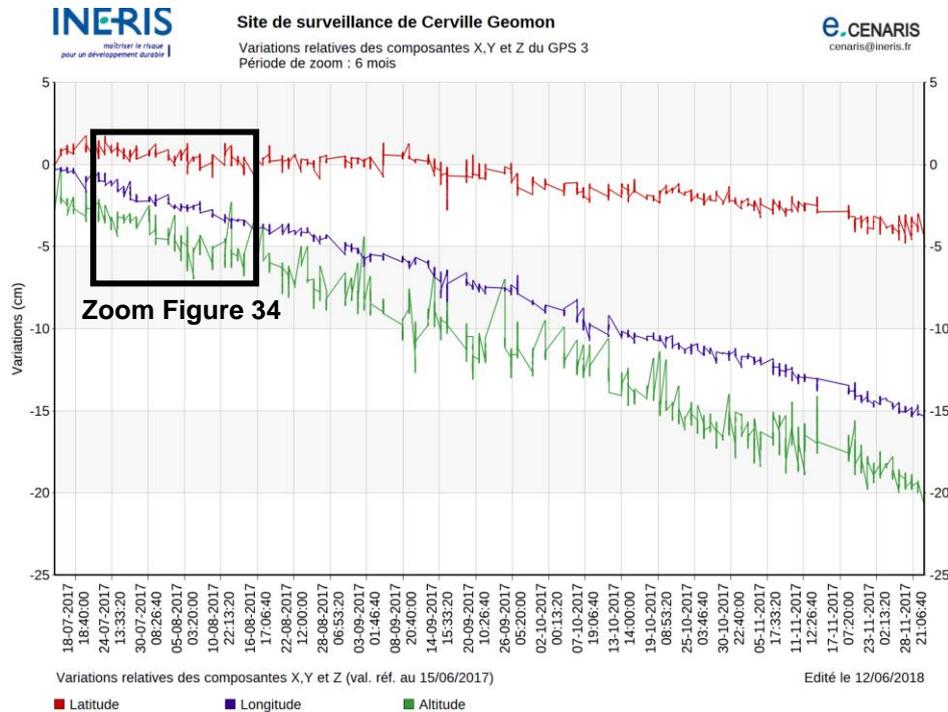


Figure 33 : Variations des composantes X, Y et Z du module GPS3 (du 15/06/17 au 01/12/17)

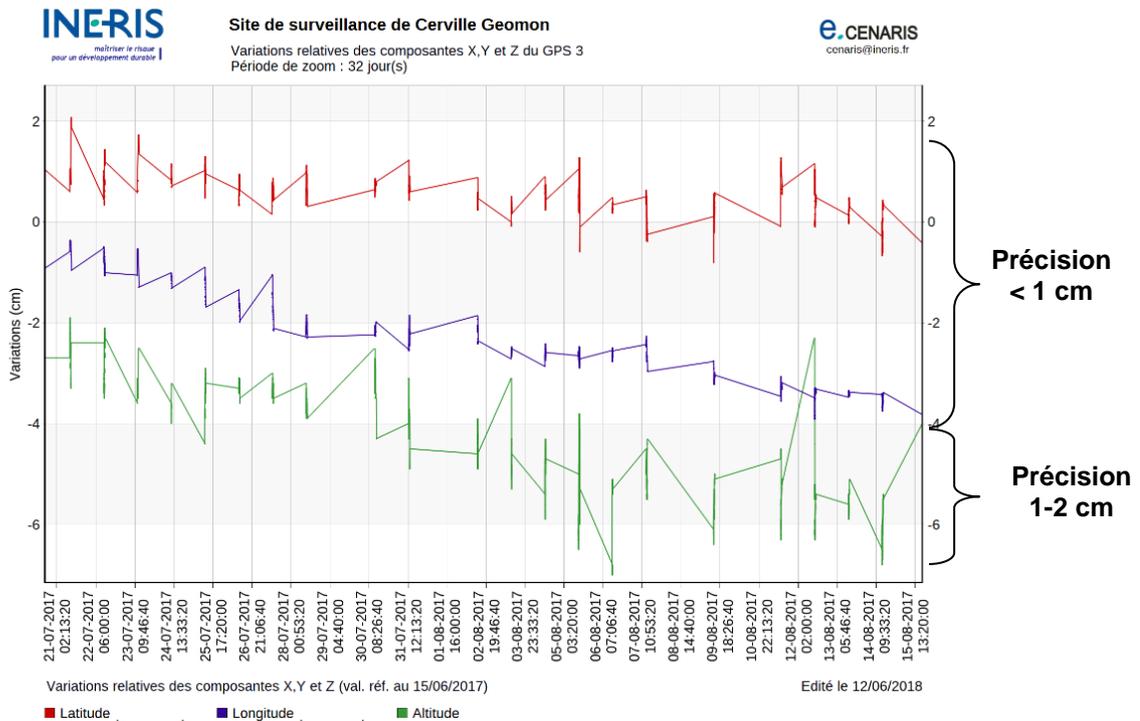


Figure 34 : Variations des composantes X, Y et Z du GPS 3 (sur 4 mois)

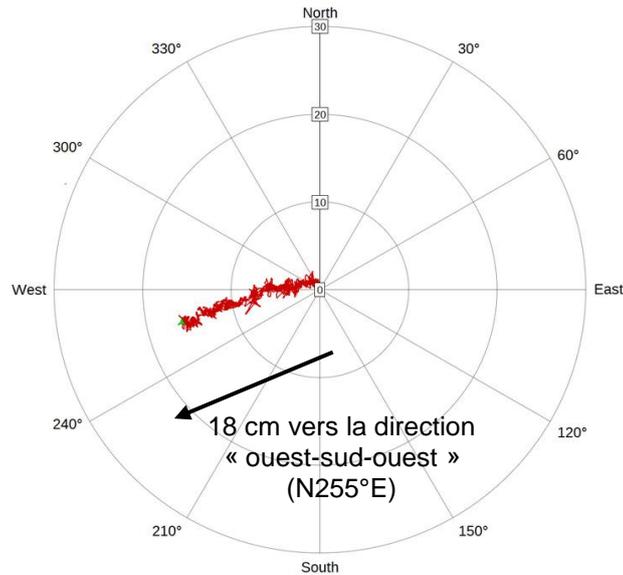


Figure 35 : Vue en plan du déplacement du module GPS3 (du 15/06/17 au 01/12/17)

7.2.2 VARIATION DU NIVEAU DU PLAN D'EAU (MODULE GPS5)

L'analyse des données a permis de relever (du 18/07/17 au 01/12/17) :

- une hausse régulière du niveau de 80 cm, soit une vitesse moyenne de 0,6 cm par jour (Figure 36) ;
- des variations de vitesse sont visibles, d'un niveau stable début novembre (Figure 36), à une hausse rapide de 3 cm par jour mi-novembre ;
- malgré le mouvement continu du module (flotteur/clapot de l'eau), la précision de la mesure d'élévation est centimétrique, entre 1 et 3 cm (Figure 38).

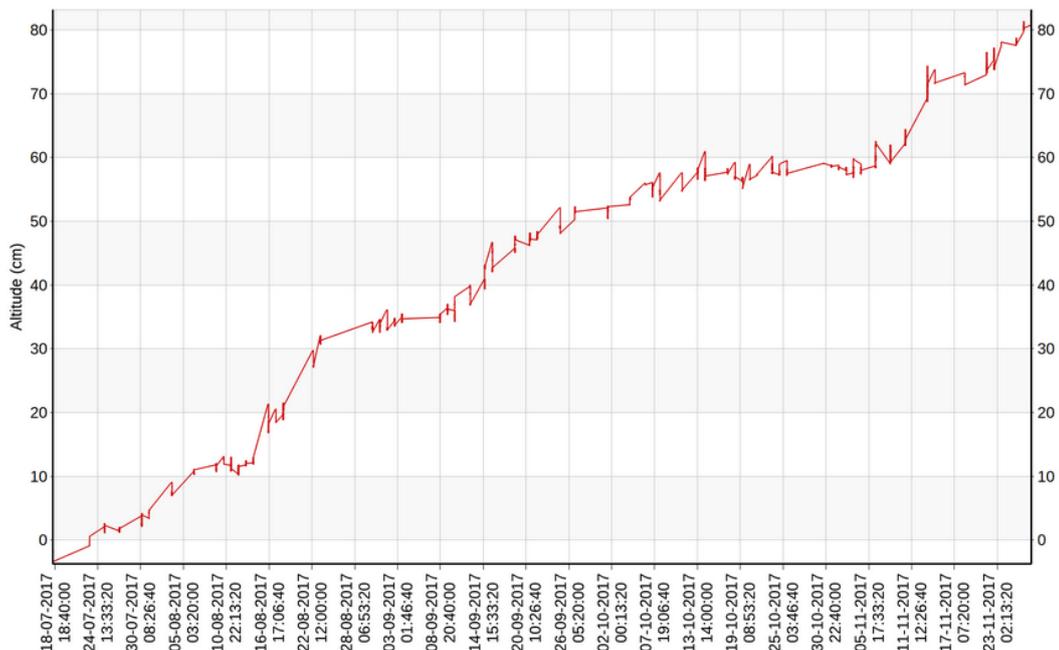


Figure 36 : Variation du niveau du plan d'eau (du 15/06/17 au 01/12/17)

Variations de la composante Z du GPS 5
Période de zoom : 39 jour(s)

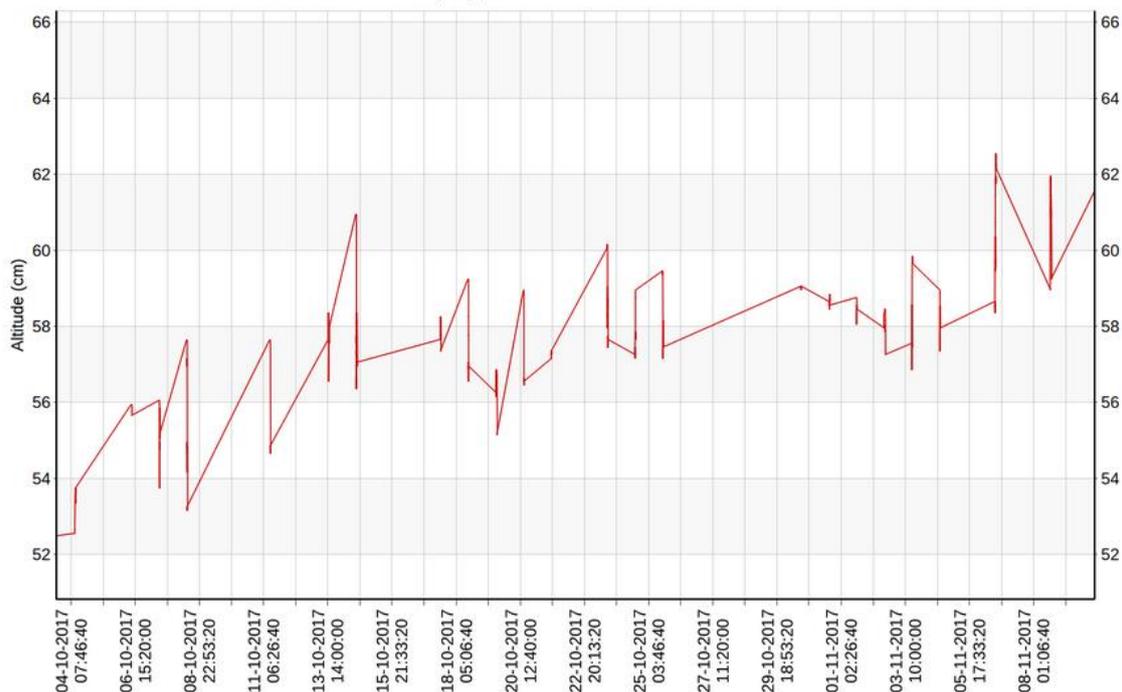


Figure 37 : Elévation mesurée du 04/10/17 au 10/11/17

Ecart interquartiles de la composante Z du GPS 5
Période de zoom : 37 jour(s)

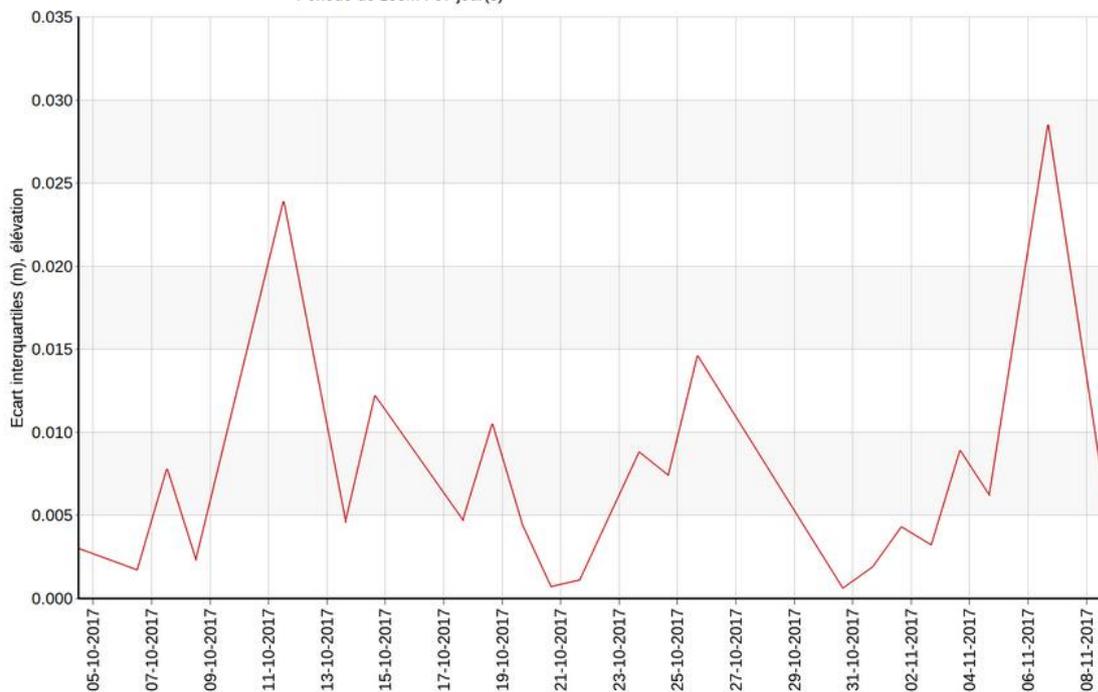


Figure 38 : Bruit de mesure du 04/10/17 au 10/11/2017

8. CONCLUSION

Le positionnement satellitaire est une technologie permettant le suivi de mouvements de terrain à distance. Plusieurs dispositifs de surveillance employant cette technologie apparaissent sur le marché avec des modes de fonctionnements (caractéristiques techniques, applications, mise en œuvre, etc.) et des coûts relativement variables.

L'Ineris a testé, en conditions réelles, l'un de ces dispositifs nommé « GEOMON » et développé par la société Infrsurvey. De prime à bord, ce dispositif se distingue par sa mise en œuvre simple et rapide, sa précision centimétrique et son cout limité.

Les tests réalisés ont permis de valider :

- ❖ La mise en œuvre : l'installation du dispositif ne nécessite aucune compétence technique spécifique. L'ensemble des composants sont déjà assemblés. Seul un tournevis pour ouvrir les boîtiers, attribuer un numéro au module et mettre en marche est nécessaire. Les modules peuvent être fixés sur un support à l'aide de colliers métalliques ou plastiques.
- ❖ La précision des mesures : dans de bonnes conditions, elle est inférieure à 1 cm dans les directions X et Y, et de 1 à 2 cm dans la direction Z. Cette précision peut être améliorée (< 0,5 cm en X/Y et < 1 cm en Z) en modifiant la méthode de calcul de la position médiane et en raccordant le dispositif à une alimentation extérieure.
- ❖ La fiabilité et l'autonomie : le dispositif garantie une autonomie pour 1h de mesures par jour. Les tests réalisés ont montré que cette autonomie est largement supérieure et elle peut être doublée (1h/12h) tout en gardant une précision centimétrique. Il est possible d'augmenter significativement le temps de mesure par jour, mais la réussite des mesures devient dépendante de la recharge des accus et donc des conditions d'ensoleillement et surtout de la saison (durée de la nuit). Par exemple, les configurations suivantes ont été réalisées avec réussite sur plusieurs semaines de suite : 1h/12h, 45min/6h, 30 min/3h, 10min/1h.
- ❖ Le paramétrage des mesures :
 - la configuration des mesures peut être faite à distance, via le serveur sur le lequel les données sont transmises. Par exemple :
 - si un glissement devient « actif », il est possible d'augmenter la périodicité des mesures (passer de 1h de mesures / 12h à 30 minutes toutes les 3h) pour suivre son évolution et être plus réactif ;
 - si un phénomène lent et de très faible amplitude est suspecté, il est possible de passer de 1h de mesure / 12h à 3h de mesure / 24h pour observer avec plus de précisions le déplacement.
 - la détermination du module de référence et l'adresse du serveur peuvent également être modifiées à distance.

Ces opérations à distance se font simplement en glissant des fichiers texte sur le serveur. Elles permettent de diminuer sensiblement le nombre de déplacements sur site.

- ❖ Le suivi à distance et l'analyse des résultats : les positions mesurées sont transmises par des fichiers au format texte. Ces données peuvent ainsi être utilisées par n'importe quel logiciel. Le logiciel dédié fourni avec le dispositif, permet de visualiser (graphe par point) et d'analyser les données (mesures/statistiques). Une page dédiée au dispositif a été créée sur e.Cenaris. Dorénavant, l'instrumentation d'un site peut être suivi par cette infrastructure. Différents graphes, tableaux de données ou aperçus cartographiques permettent de suivre et de qualifier à distance l'évolution d'un mouvement de terrain. e-Cenaris apporte en plus la possibilité de paramétrer des seuils d'alerte et de mieux gérer la survenue d'événements pouvant impacter des enjeux.

Les limites du dispositif testé et/ou les améliorations envisageables :

- La distance entre le module de référence et le point de mesure ne peut excéder 2 à 3 km. Au-delà, la précision des positions se dégradera. Cette limite est liée au fait que le dispositif utilise un récepteur de phase L1. Ce récepteur explique en grande partie le bas coût du dispositif. Les autres dispositifs existant sur le marché utilisent des récepteurs de phases L1 et L2. Ces derniers sont beaucoup plus onéreux, mais ils garantissent une même précision sur des distances référence/mesure bien plus élevées.
- La gestion des cycles de mesures est assurée par une minuterie et non par une horloge. Ce système assure une programmation simple et fiable (absence de bugs liés au fuseau horaire, au changement d'heure, au reboot du dispositif hors connexion, etc.). En contrepartie, il n'est pas possible d'imposer des heures fixes. Par exemple, des mesures quotidiennes à 12h et à 18h ne peuvent pas être programmées. Seul l'intervalle de temps entre deux sessions définit le cycle des mesures. Ce paramétrage peut être modifié à chaque connexion du dispositif avec le serveur ou au moment d'un redémarrage forcé.
- Le calcul de la position peut être amélioré. Le dispositif fournit des positions calculées par le logiciel RTK Lib (1 position/10secondes). Pour obtenir la position moyenne ou médiane d'une session de mesure de 30 minutes par exemple, un traitement supplémentaire est nécessaire. Les logiciels de suivi (GEOMON Basic ou e-Cenaris) applique un traitement prédéfini et systématique (voir détail au paragraphe 3.4). En fonction des caractéristiques du site instrumenté (qualité des conditions environnementales, dispositif autonome ou alimenté, mouvements de terrain actif, etc.), les paramètres de ce traitement pourraient être affinés de sorte à fournir des positions plus précises ou des mesures plus régulières. Cette opération nécessiterait un paramétrage supplémentaire (définir le nombre de positions $Q=1$ à la suite nécessaire pour calculer une position médiane ou un nombre de satellite plus élevé, etc.).