

L'optimisation
de la conception
des procédés
et des performances



nouvelles **A**pproches de **R**econnaissance
des **S**ols et de **C**onception des **O**uvrages
géotechniques avec le **P**ressiomètre



Automatisation de l'essai pressiométrique

Présentation des modes automatisés mis en place dans la gamme GeoPAC

Lionel DARE – Chef de Produits APAGEO – l.dare@apageo.com

Damien BRECHOT – Directeur Technique APAGEO – d.brechot@apageo.com

► Automatisation de l'essai pressiométrique

- 1. Présentation de l'équipement PMT
- 2. GéoPAC : Principe de la mise en pression mécanique du circuit d'eau
- 3. Automatisation de procédures hors essais
- 4. Démarrage d'un essai PMT : calibrage des pertes de charge
- 5. Prise de décisions, paramètres de régulation, calcul automatique des pas de paliers
- 6. Présentation des modes de travail développés
- 7. Conclusion



L'ÉVOLUTION DU PRESSIOMÈTRE® MÉNARD®



PAC (Pressiomètre Assisté par Calculateur)
Un modèle trop en avance sur son temps



1982

GeoPAC®
Pressiomètre
Auto-Contrôle



2009

HyperPAC®
Pressiomètre Auto-Contrôlé
Hyper Pression



2013

GeoPAC®
Compact



2023

Création du 1^{er}
Pressiomètre
type A

1955



Pressiomètre type C
1^{er} appareil en série
véritablement opérationnel

1957



Pressiomètre type G
Évolution vers une
simplification de
l'équipement

1965



Pressiomètre type GA
+ d'ergonomie
+ robuste
+ facile à transporter

1965



Pressiomètre + SPAD
Intégration de
l'acquisition de données

1992



Pressiomètre + GeoSPAD
Technologies évolutives

2003



Pressiomètre + GeoBOX®
Technologies de pointe

2009

Super Pressio 150 bars + GeoBHX

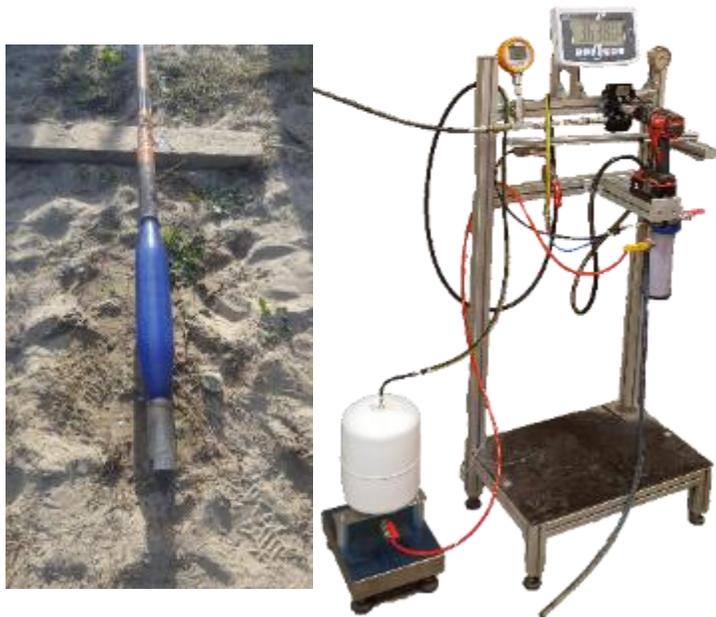
2018



VISUALISATION INSTANTANÉE DES COURBES



PRESENTATION DE DIFFERENTS EQUIPEMENTS PRESSIOMETRIQUES AYANT PARTICIPES AU PROJET NATIONAL ARSCOP



CPV et sonde FC® (prototype de recherche)



Prevo100 avec ADN, Jean Lutz SA

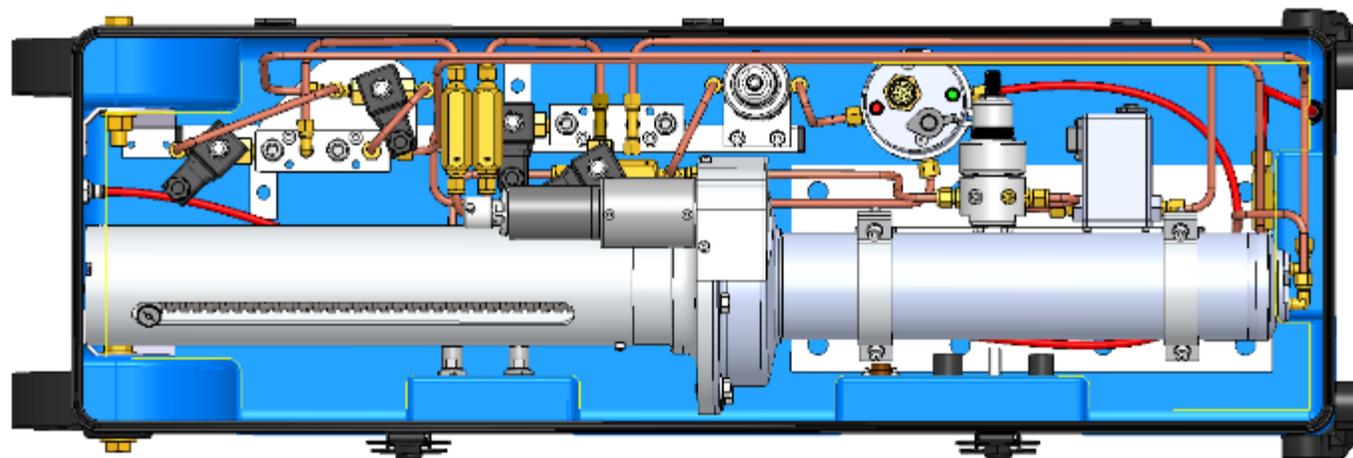


GeoPAC® avec GeoBOX®, APAGEO

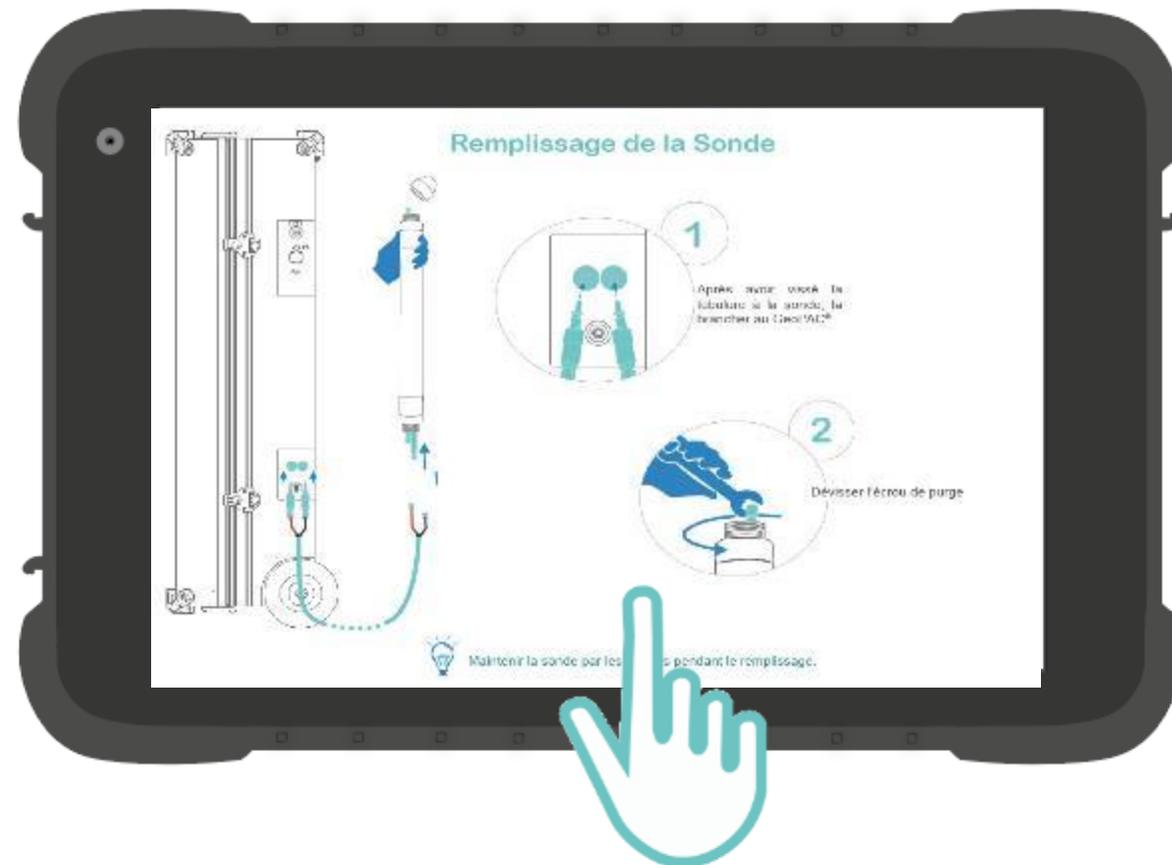
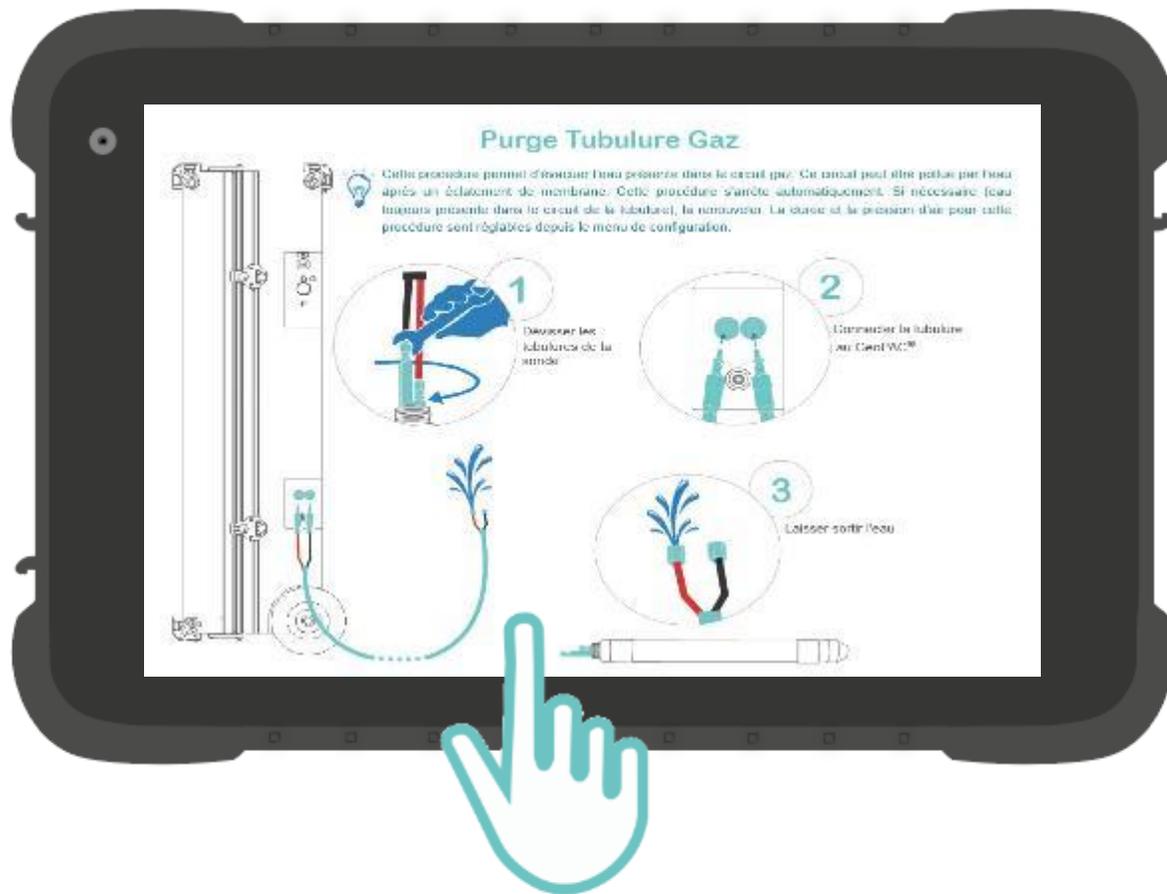


Le pilotage de la Pression et du Volume du GéoPAC est essentiellement assuré par un piston, dans un cylindre de volume adapté à la gamme des sondes proposées par la norme ISO 22476-4:2021.

Ce piston est déplacé par une micro-motorisation de précision, entièrement pilotée par la tablette de chantier GeoBOX communiquant sans fil avec les organes de commande, de régulation et de mesure.

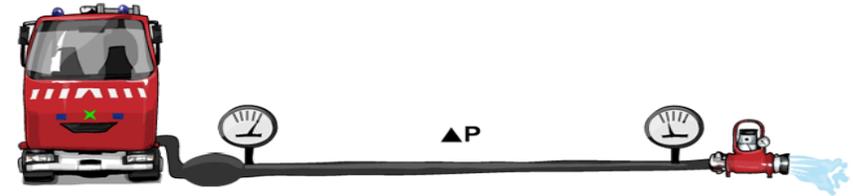


EXEMPLE D'AUTOMATISATION DES DIFFÉRENTES OPÉRATIONS HORS ESSAIS LIÉES À L'UTILISATION D'UN PRESSIOMÈTRE



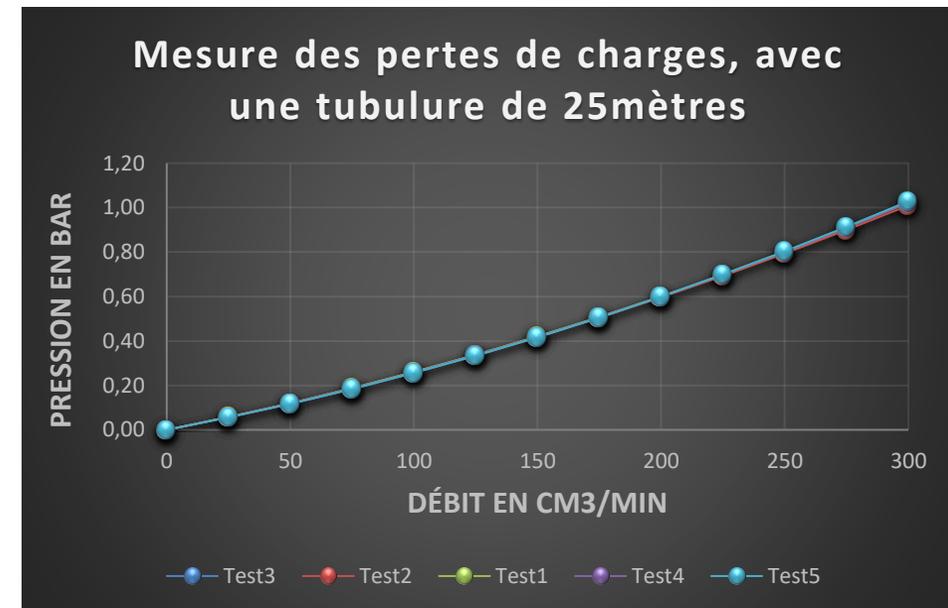
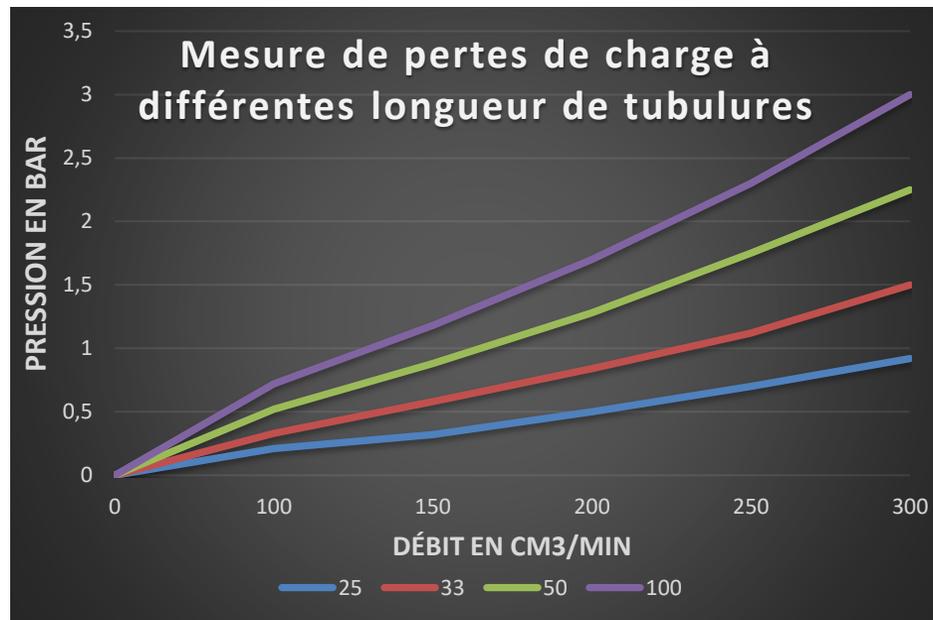
► Principe et compréhension des **pertes de charge**:

Lors de l'écoulement d'un fluide au travers d'un tuyau ou tubulure, il existe une différence de pression entre l'amont du tuyau et la sortie du fluide.



► **La mesure instantanée et la prise en compte dans la régulation de la perte de charge**, impossibles lors d'un essai classique avec un contrôleur pression-volume à détendeurs manipulés manuellement, est devenue avec le pressiomètre autocontrôlé GeoPAC, à la fois **une possibilité et une nécessité**.

► Exemple de mesures in situ faites pour déterminer les pertes de charges :



- ▶ Obligation de **maintien de la pression différentielle** entre la cellule d'eau & d'air, surtout pendant les phases de montée en pression & maintien du palier à la consigne de pression.

le circuit liquide se bloque si le circuit gaz peine à atteindre sa consigne, et vice versa.

- ▶ Changement de palier en moins de 20 secondes (norme ISO 22476-4:2021) impliquant un **ajustement continu** des paramètres de régulation, suivant la réaction & dynamique de l'essai

- ▶ Mode automatique / semi-automatique:

- **Automatique** : Calcul des pas de palier par le GeoPAC, prise de décision par l'automate si un changement de pas est nécessaire afin de limiter le nombre de palier de l'essai, en fonction de la réaction du terrain
- **Semi-Automatique** : réglage par l'opérateur à tout moment de l'essai des consignes de pas de palier, le Géopac poursuivant la régulation selon les paliers imposés jusqu'en fin d'essai ou changement d'avis de l'opérateur.

- ▶ Zoom sur le calcul des pas de palier :

en fonction des 1eres mesures, et en visant un essai pressiométrique standard en 10-12 paliers, l'automate augmentera (2 fois maximum) la consigne de pas de palier au cours de l'essai . Un algorithme de calcul de la Pression Limite potentielle dès la fin du 4è palier permet, en fonction de la réaction de tous les paliers réalisés, une prise de décision automatique de changement de pas.

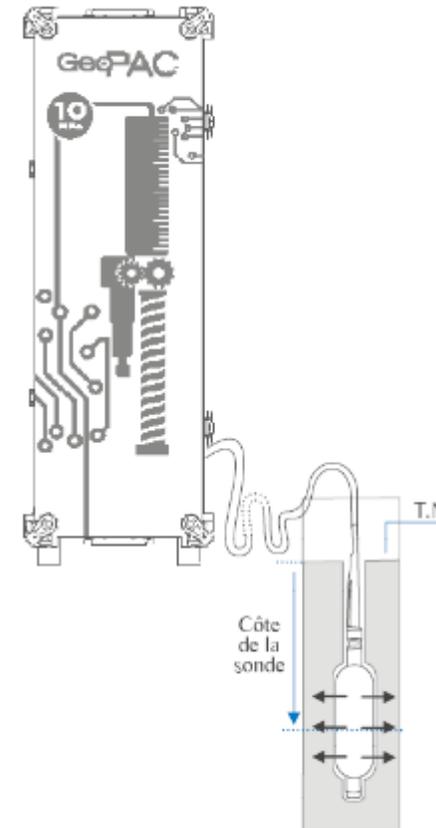
L'automate compare aussi son résultat avec la valeur de pas introduite par l'opérateur au démarrage de l'essai

LA TECHNOLOGIE INNOVANTE DU GEOPAC DONNE LA MAÎTRISE DES RELATIONS ENTRE PRESSION ET VOLUME, ET PERMET L'AUTOMATISATION DE PLUSIEURS MODES DE TRAVAIL :

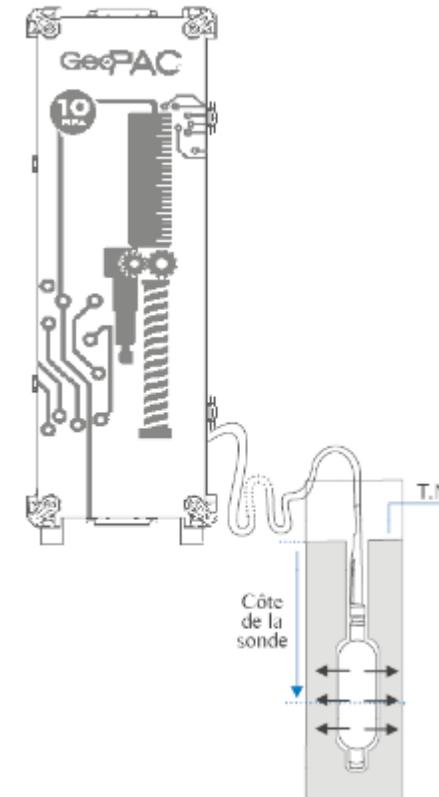
- ▶ Essai pressiométrique en mode pression contrôlée standard (NF EN ISO 22476-4:2021)
- ▶ Essai pressiométrique en mode pression contrôlée cyclique (NF EN ISO 22476-5:2023)
- ▶ Essai en mode volume contrôlé (NF EN ISO 22476-5:2023)
- ▶ Essai en mode volume contrôlé cyclique (NF EN ISO 22476-5:2023)
- ▶ Essai en mode mixte pression et volume contrôlés, standard ou cyclique (NF EN ISO 22476-5:2023)
- ▶ Essai en mode pression contrôlée, sinusoïdale (NF EN ISO 22476-5:2023)
- ▶ Essai pressiométrique en Hyper Pression (NF EN ISO 22476-5:2023)

Pour chaque mode de travail, le GeoPAC enregistre les données d'essai à chaque seconde, dans un format lisible directement sur tableur Excel.

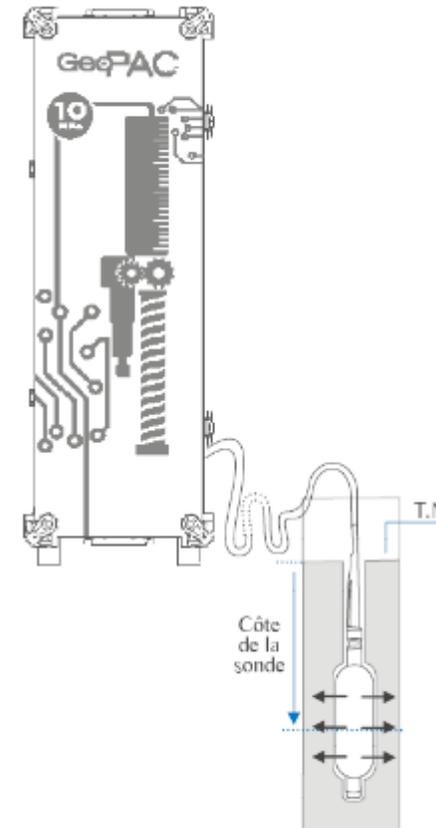
- ▶ Le GeoPAC effectue des paliers de **PRESSION** (liquide) d'une durée d'une minute, jusqu'à atteindre la pression ou le volume maximal défini dans la norme pour la sonde utilisée.
- ▶ Les paliers de PRESSION sont **croissants**, engendrant une expansion de la sonde dans le forage.



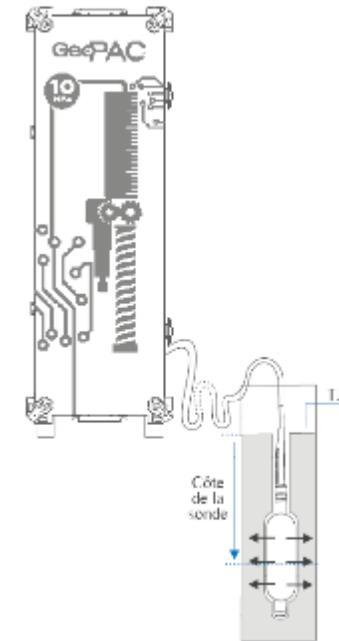
- Le GeoPAC effectue des paliers de **PRESSION** (liquide) croissant d'une durée d'une minute (ou plus, paramétrable), jusqu'à atteindre la **pression de déchargement** (paramétrée par l'opérateur) en fin de phase pseudo élastique proche de P2 puis entame les paliers de pression à la descente (un ou plusieurs, toujours au choix de l'opérateur) avant d'atteindre la **pression de rechargement** proche de P1 pour repartir en phase ascendante, etc.. en fonction du nombre de cycles choisi au début de l'essai.



- ▶ Le GéoPAC effectue des paliers de **VOLUME** d'une durée réglable, jusqu'à atteindre la pression ou le volume maximal définis dans la norme pour la sonde utilisée.
- ▶ Les paliers de **VOLUME** sont croissants, engendrant une expansion de la sonde dans le forage.



- ▶ Volume Contrôlé Cyclique : Le GeoPAC effectue des paliers de **VOLUME** croissant d'une durée réglable, jusqu'à atteindre le volume de fin de phase pseudo élastique (paramétrée par l'opérateur) puis entame les paliers de volume à la descente (un ou plusieurs, toujours au choix de l'opérateur) avant d'atteindre le volume proche de V1 pour repartir en phase ascendante, en fonction du nombre de cycles choisi au début de l'essai
- ▶ Mode Mixte, Pression & Volume Contrôlé : Le GeoPAC travaille selon le choix de l'opérateur en **mode pression ou volume contrôlé** et peut **basculer de mode en cours d'essai**, sur demande de l'opérateur;



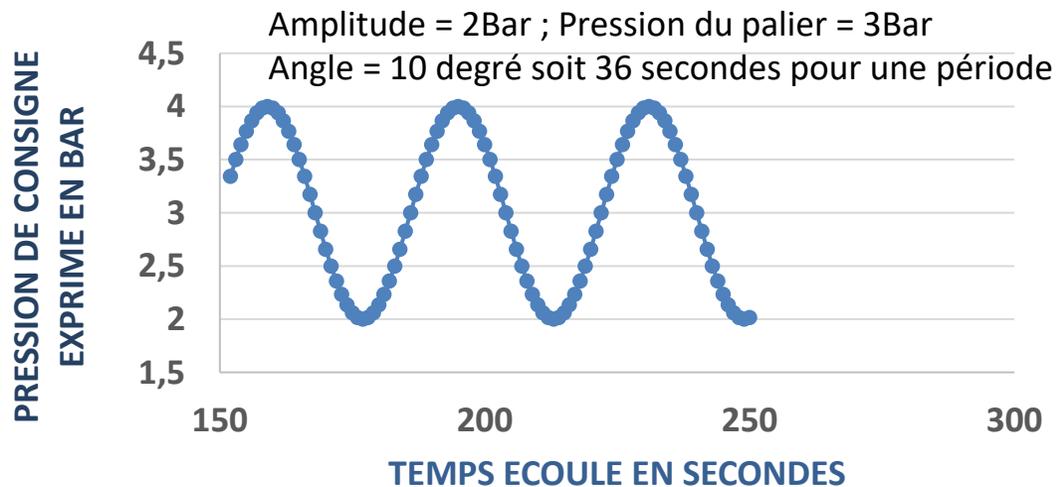
Principe & algorithme :

- Palier à consigne de **pression constante ou en sinus**.
- Définition du sinus par son amplitude (bar), sa période (degré) et le nombre de période souhaité sur le palier
- **Génération d'une nouvelle consigne de pression** toutes les 500ms

- **Consigne** = $PressionPalier + (Amplitude/2) * \sin(Angle)$

Où l'angle est en fonction du temps & de la période (en s) :

$$Angle = (Temps * 2 * \pi * 360) / période + numéropériode * 2 * \pi$$



- ▶ **Extension des modes de travail** (pression & volume contrôlé, cyclique, ...) du Geopac à la **très haute pression** (300Bar max)
- ▶ Utilisation / développement d'une **sonde pressiométrique**, monocellulaire, permettant d'atteindre ces pressions élevées. 2 types de gaines sont validés et proposés : en polyuréthane et en caoutchouc toilé



Le développement de l'automatisation de l'essai pressiométrique nous a conduit à devoir quantifier et qualifier tous les phénomènes intrinsèques à l'écoulement et la mise en pression mécanique d'un liquide pour la mesure volumétrique (circuit d'eau) et en parallèle à avoir une profonde réflexion sur la régulation indépendante des 2 circuits gaz et eau.

- ▶ Mise en évidence de l'intérêt essentiel de la mesure des pertes de charge jusqu'alors jamais prise en compte par les pressiomètres classiques à pression de gaz sur la colonne d'eau et mesure volumétrique de la déformation.
- ▶ Création d'un algorithme de changement automatique de pas de pression pour rendre l'appareil autonome, tout en y intégrant la possibilité de prise de contrôle par l'opérateur (mode semi automatique.)
- ▶ Fort des possibilités offertes par la régulation mécanique de la pression et du volume du circuit d'eau, élaboration de plusieurs programmes d'essai permettant tous les scénarii d'essai possibles (pression et volume contrôlés, cyclique en pression et en volume, mode mixte volume/pression, mode Hyper Pression jusqu'à 300 bars, cyclique sinusoïdal...), décrit maintenant dans la toute dernière révision de la norme NF EN ISO 22476-5:2023
- ▶ Apport d'un gain très important de précision sur les volumes et les pressions avec le contrôle micrométrique du piston, la régulation permanente des pressions et la simultanéité des prises de données
- ▶ Ne jamais oublier que l'automatisation de toute la procédure d'essai libère le sondeur d'une tâche répétitive, mais que l'essentiel pour la qualité de l'essai reste la maîtrise du calibrage du forage et de la réduction de la décompression entre forage et essai : un essai automatisé dans un forage médiocre donnera une courbe précise, celle d'un sol sous-estimé.

Merci à tous pour votre attention!