

# INVENTAIRE DES MOYENS SISMIQUES

## A - INTRODUCTION

Les mouvements écologistes s'opposent fermement aux campagnes de sismique 3D par explosion sur terre (onshore) en dénonçant l'impact direct des détonations sur la faune et les écosystèmes, la destruction des sols et de la végétation par le passage d'engins lourds, ainsi que les risques de contamination des nappes phréatiques. Ils critiquent surtout cette méthode comme un outil facilitant à outrance l'expansion des énergies fossiles.

Le grand public ne connaît pas les évolutions technologiques récentes des techniques d'exploration par sismique et ignore la diversité des types de sismique existants. Dans l'esprit du public, les seules méthodes d'exploration se résument généralement aux sismiques par explosions et aux sismiques par Vibroseis.

Les principaux arguments environnementaux et sociétaux soulevés contre la sismique traditionnelle s'articulent autour de plusieurs axes majeurs :

### 1. Impact des ondes de choc et des explosifs sur la faune et la flore

- **Perturbation des écosystèmes:** Les charges explosives, placées dans de petits forages préalables, génèrent des ondes sismiques de forte intensité. Celles-ci perturbent gravement les animaux terrestres et souterrains, provoquant un stress aigu, des modifications comportementales durables, voire la désertion complète de zones de reproduction ou d'hivernage.
- **Destruction des habitats:** Pour implanter les lignes physiques de géophones et les sources (qu'il s'agisse d'explosifs ou de camions vibreurs), il est souvent nécessaire de défricher et de créer des pistes d'accès rectilignes dans des zones naturelles fragiles ou des forêts, entraînant une fragmentation sévère des habitats et une érosion accélérée des sols.

### 2. Risques liés aux forages pour les explosifs

- **Pollution des aquifères:** La méthode par explosion nécessite de creuser des trous de tir d'une profondeur variant de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres. Les experts pointent du doigt le risque majeur de contamination des nappes phréatiques superficielles et profondes, soit par le mélange accidentel des eaux de différentes couches, soit par l'infiltration de résidus chimiques issus des explosifs.
- **Dégradation géologique:** L'utilisation répétée de la dynamite peut engendrer des micro-fractures au sein de la matrice rocheuse sous-jacente, modifiant de fait les écoulements d'eau souterrains et fragilisant de manière irréversible la stabilité mécanique des sols.

### Nuisances pour les riverains

- **Vibrations et pollutions sonores:** Les explosions successives et le passage continu de lourds camions génèrent des ondes acoustiques et des vibrations de forte amplitude qui

# INVENTAIRE DES MOYENS SISMIQUES

incommodent les populations locales et peuvent provoquer des micro-fissures structurelles dans les fondations des bâtiments environnants.

## 4. La critique climatique globale

- **Poursuite de l'ère des énergies fossiles:** Au-delà des dégâts physiques visibles directement sur le terrain, l'argument central des organisations non gouvernementales (ONG) est que la sismique 3D n'est qu'une phase préparatoire d'exploration industrielle coûteuse. Son but ultime reste la découverte de nouveaux gisements de pétrole, de gaz conventionnel ou de gaz de schiste. Pour les mouvements environnementaux, investir massivement dans cette technologie va à l'encontre directe des objectifs internationaux de décarbonation et de lutte contre le réchauffement climatique.

Note sur la différence fondamentale :

La différence fondamentale entre les deux grandes méthodes traditionnelles réside dans le contrôle précis de l'énergie: la sismique par explosion libère une impulsion acoustique violente, destructive et instantanée, tandis que le camion vibreur (Vibroseis) injecte une onde de fréquence continue, progressive et modulée dans le sol.

# INVENTAIRE DES MOYENS SISMIQUES

## 5. Comparaison détaillée des impacts (Contrôle de l'énergie)

Catégorie d'Impact	Sismique par Explosifs (Dynamite)	Sismique par Camions Vibreurs (Vibroseis)
<b>a- Impacts environnementaux et écologiques</b>	Fort risque de détérioration et de traumatisme de la faune locale par l'effet de surprise du bruit soudain. Pollution potentielle durable du sous-sol par les résidus chimiques des charges après détonation.	Nuisances sonores continues mais progressives (montée en fréquence), permettant la fuite préventive des animaux. Le risque de pollution est strictement limité aux fuites accidentelles de fluides hydrauliques des véhicules.
<b>b- Impacts sur les structures et infrastructures</b>	Génération de fortes vibrations de surface pouvant fissurer les bâtiments proches. L'utilisation est strictement interdite ou extrêmement réglementée à proximité des zones urbaines.	Utilisation de fréquences modulées et programmées pour éviter d'atteindre la fréquence de résonance des bâtiments voisins. Déploiement sûr, éprouvé et très fréquent en milieu urbain ou industriel.
<b>c- Impacts géophysiques et qualité des données</b>	Signal à haute fréquence idéal pour imager les structures géologiques très profondes. Cependant, la zone d'impact direct subit une modification de sa structure (zone plastique), ce qui altère le signal initial.	Signal parfaitement répétable et ajustable (choix précis des gammes de fréquences) pour cibler des couches géologiques spécifiques. La pénétration est toutefois plus faible dans les sédiments très denses ou à très grande profondeur.
<b>d- Impacts logistiques et de terrain</b>	Nécessite obligatoirement le forage préalable de puits de tir profonds. Implique une logistique lourde liée à la sécurité réglementaire, au stockage et au transport de matières dangereuses.	Engendre un compactage de surface visible dû au poids très lourd des camions (généralement entre 20 et 30 tonnes). Son utilisation est par conséquent limitée aux terrains carrossables ou accessibles par des pistes routières.

## 6. Les profondeurs de recherches selon les cibles

Le choix de la méthode d'exploration ou de forage dépend directement de la profondeur de la cible géologique :

- Très faible profondeur (0 à 50 mètres): Géotechnique
  - Cette zone concerne la construction d'infrastructures, les fondations et l'étude mécanique des sols.

# INVENTAIRE DES MOYENS SISMIQUES

- Outils: Essais au pénétromètre (SPT/CPT), Forage à la tarière, Carottage conventionnel, Tomographie de résistivité électrique (ERT).
- Faible à moyenne profondeur (50 à 500 mètres): Géotechnique lourde & Géothermie de surface
  - Ce segment cible les grands ouvrages d'art (tunnels) et la géothermie sur sondes (pompes à chaleur).
  - Outils: Forage Rotary (circulation directe), Forage au marteau fond de trou (MFT), Sismique réflexion.
- Grande profondeur (500 à 3 000 mètres): Géothermie profonde (Hydrothermie)
  - Cette profondeur vise la capture des aquifères chauds pour le chauffage urbain ou la production d'électricité.
  - Outils: Forage Rotary lourd (avec moteurs de fond performants pour forage dirigé), Sismique réflexion 2D/3D, Diagraphies différées (gamma-ray, neutrons).
- Très grande profondeur (Au-delà de 3 000 à 7 000 mètres): Pétrole, Gaz & Géothermie stimulée (EGS)
  - Ce domaine d'extrême profondeur requiert des technologies de pointe pour résister à d'intenses pressions et températures.
  - Outils: Technologie satellitaire RSS-NMR (l'intégralité de la récupération des données s'effectue depuis l'espace par satellites dédiés), Sismique réflexion 3D/4D.

## B - VIBROSEIS VERSUS EXPLOSION

L'impact environnemental, logistique et technique de la méthode Vibroseis (camions vibrants) et de la sismique par explosion (dynamite) varie radicalement selon la nature topographique du terrain.

De manière générale, la Vibroseis est privilégiée en milieu urbain et désertique pour sa sécurité opérationnelle et sa rapidité d'exécution. À l'inverse, la sismique par explosion reste techniquement indispensable en forêt dense en raison des contraintes d'accessibilité géographiques.

### Analyse détaillée par milieu d'intervention

#### 1. Impact en milieu forestier

- **Vibroseis - Destruction de la flore:** Les camions pesant plusieurs dizaines de tonnes exigent l'ouverture de pistes rectilignes larges de 3 à 5 mètres, provoquant une déforestation locale significative.
- **Vibroseis - Fragmentation des habitats:** L'ouverture de ces larges voies perturbe durablement la faune sauvage et rompt les corridors écologiques.

# INVENTAIRE DES MOYENS SISMIQUES

- **Vibroseis - Tassement du sol:** Le poids extrême des engins détruit de manière irréversible la structure superficielle du sol forestier.
- **Sismique par explosion - Préservation de la canopée:** Le transport du matériel de forage léger ne demande que des sentiers étroits de moins de 1,5 mètre.
- **Sismique par explosion - Nuisance éphémère:** Les détonations souterraines provoquent un bruit instantané qui effraie ponctuellement la faune, mais l'impact physique reste minime.

## 2. Impact en milieu désertique

- **Vibroseis - Logistique idéale:** Les grands espaces plats permettent aux convois de camions de progresser à une vitesse record.
- **Vibroseis - Zéro déchet:** Cette méthode ne laisse aucun résidu chimique dans le sol et ne nécessite pas l'utilisation d'eau.
- **Vibroseis - Traces superficielles:** Le passage laisse des empreintes de pneus dans le sable, qui s'effacent rapidement sous l'action naturelle du vent.
- **Sismique par explosion - Difficultés de forage:** Forer des trous de tir dans des dunes de sable instables nécessite des tubages systématiques, ce qui ralentit la cadence.
- **Sismique par explosion - Consommation de ressources:** Le processus de forage requiert de grandes quantités d'eau, une ressource critique et rare en milieu désertique.

## 3. Impact en milieu urbain et péri-urbain

- **Vibroseis - Sécurité des infrastructures:** Les vibrations émises sont programmées électroniquement. Elles respectent des normes strictes pour ne pas endommager les fondations.
- **Vibroseis - Nuisance sonore modérée:** Le bruit émis est comparable à celui d'un moteur de gros camion industriel pendant quelques secondes.
- **Sismique par explosion - Danger critique:** Les ondes de choc d'une explosion non contrôlée peuvent fissurer les bâtiments et rompre les réseaux sensibles.
- **Sismique par explosion - Interdiction légale:** Dans la quasi-totalité des pays, l'usage de la dynamite est totalement interdit à proximité immédiate des zones habitées.

Conclusion de l'évaluation du terrain :

Le choix de la technologie dépend d'un arbitrage fin entre l'accessibilité géographique et la préservation de l'environnement. La Vibroseis s'impose partout où les véhicules peuvent circuler sans détruire la nature. À l'inverse, la sismique par explosion demeure la seule méthode viable pour imager le sous-sol des zones topographiquement complexes (forêts denses). Cependant, il est désormais clair que ces deux techniques conventionnelles ne peuvent pas être utilisées au sein d'un parc national.

## C - LES NOUVELLES TECHNOLOGIES D'EXPLORATION : LA RSS-NMR ET LA SISMIQUE DE BAS IMPACT

L'utilisation de la technologie RSS-NMR (Remote Sensing Survey - Nuclear Magnetic Resonance) représente l'une des solutions les plus innovantes et respectueuses pour étudier le sous-sol d'un parc naturel ou d'une zone protégée. Contrairement à la sismique 3D conventionnelle, la RSS-NMR est une méthode strictement passive et non intrusive.

### 1. Problématiques de la sismique classique en zones sensibles

- **Destruction de la flore:** Obligation de tracer des lignes droites (layons) en coupant la végétation.
- **Perturbation de la faune:** Les explosions ou les fortes vibrations provoquent une pollution sonore permanente qui fait fuir les animaux.
- **Procédures administratives bloquantes:** L'obtention de permis d'exploration environnementaux prend souvent des années, voire s'avère impossible.

### 2. Principes fondamentaux de l'alternative passive RSS-NMR

- **La Télédétection (RSS):** Des capteurs satellites effectuent des analyses spectrales avancées afin d'identifier les anomalies géologiques sans contact physique.
- **La Résonance Magnétique Nucléaire (RMN/NMR):** Elle utilise les variations du champ magnétique terrestre combinées à des micro-waves pour faire réagir les protons des fluides (eau, hydrocarbures). Chaque fluide renvoie un signal électromagnétique unique.

### 3. Applications concrètes pour la préservation des parcs naturels

- **Hydrogéologie et gestion de l'eau:** Cartographier avec précision les nappes phréatiques, évaluer la porosité du sol et sécuriser l'approvisionnement en eau.
- **Études structurales et risques:** Détecter les failles géologiques afin de prévenir les glissements de terrain ou les risques sismiques.
- **Transition énergétique:** Évaluer le potentiel géothermique d'une zone.

## D - ANALYSE COMPARATIVE TRIPARTITE DES TECHNOLOGIES D'EXPLORATION

Ces trois techniques présentent des différences d'impacts environnementaux, opérationnels et techniques majeures. Les deux premières sont des techniques actives, tandis que la RSS-NMR est une méthode passive et non destructive.

### 1. Évaluation détaillée des impacts par technologie

#### La Sismique par Explosion (Dynamite)

- **Impact environnemental: Élevé.** Elle nécessite le forage de puits de tir, perturbe la faune et endommage la flore lors du défrichage.
- **Impact vibratoire: Élevé.** Les explosions génèrent des ondes de choc brèves mais violentes. Risque pour la stabilité des sols.
- **Impact sonore: Élevé.** Nuisances sonores aériennes et souterraines massives.

#### La Sismique par Camions Vibreurs (Vibroscis)

- **Impact environnemental: Modéré.** Aucun explosif. L'impact provient du tassement mécanique du sol et du défrichage minimal.
- **Impact vibratoire: Faible à contrôlé.** Les vibrations sont progressives (balayage de fréquences) et respectent les normes strictes.
- **Impact sonore: Modéré.** Le bruit provient principalement des moteurs thermiques des camions.

#### L'exploration par RSS-NMR (Téledétection et RMN)

- **Impact environnemental, vibratoire et sonore: Strictement NUL.** L'acquisition se faisant depuis l'espace, elle n'émet aucune onde de choc, ne nécessite aucun véhicule lourd et aucun forage.
- **Impact réglementaire: Très faible.** Elle élimine le besoin d'obtenir des permis environnementaux lourds.

### 2. Processus de prise de décision stratégique et marquage des Sweet Points

La technologie RSS-NMR va cartographier et marquer précisément les « Sweet points » (les zones optimales d'accumulation de fluides) sur le bloc exploré. À ce stade précis, les propriétaires du bloc doivent décider s'ils engagent la phase suivante d'exploration par puits d'essais.

# INVENTAIRE DES MOYENS SISMIQUES

Bien que la méthode RSS-NMR fournisse les coordonnées complètes pour implanter directement un puits, il est fréquent que les propriétaires souhaitent valider et affiner les données par une méthode sismique locale focalisée sur ces Sweet points. Nous préconisons alors l'usage des techniques modernes de sismique à nodes portées (notamment La sismique à faible impact (Low Impact Seismic - LIS) ), qui s'avèrent être la meilleure option.

## E - LA SISMIQUE DE LOW IMPACT OU SISMIQUE À NODES PORTÉES

La sismique à faible impact (Low Impact Seismic - LIS) ou la sismique à nodes portées représentent une révolution technologique majeure permettant d'imager le sous-sol avec une résolution ultra-haute tout en réduisant de manière drastique l'empreinte environnementale.

### 1. Les piliers de la sismique à faible impact (Low Impact Seismic)

- **Des lignes d'exploration réduites et sinueuses:** Les lignes de passage sont réduites à moins de 2 mètres et contournent manuellement les grands arbres, ce qui préserve la canopée.
- **Des sources d'énergie miniaturisées:** Utilisation de sources d'ondes beaucoup plus légères (petites charges enfouies à faible profondeur ou mini-chutes de poids).
- **La sismique passive:** Utilisation croissante du bruit ambiant naturel de la Terre comme source d'onde continue.

### 2. Fonctionnement des systèmes nodaux sans câble (Nodes Portées)

- **Le concept de « Node »:** Un node est un petit boîtier électronique tout-en-un étanche qui intègre un capteur géophone, une batterie interne et une puce GPS.
- **L'aspect « Portée » (Déploiement manuel):** Des équipes légères à pied transportent des sacs à dos contenant des dizaines de nodes (LA SISMIQUE À FAIBLE IMPACT (LOW IMPACT SEISMIC - LIS) ) et les plantent directement dans le sol.
- **Enregistrement en continu:** Les nodes enregistrent les vibrations en continu pendant plusieurs semaines avant d'être ramassés à pied pour téléchargement.

## F - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS STRATÉGIQUES

La meilleure méthode pour explorer les réserves pétrolières potentielles dans un espace hautement protégé comme le parc naturel du Chaco paraguayen est la méthode LOW IMPACT combinée à la RMN (RSS-NMR). Elle offre le compromis parfait entre une

# INVENTAIRE DES MOYENS SISMIQUES

imagerie géologique profonde et un impact environnemental minimal au sol, excluant de fait l'usage destructeur des explosions.

## 1. Avantages de l'alliance technologique RSS-NMR + LA SISMIQUE À FAIBLE IMPACT (LOW IMPACT SEISMIC - LIS)

### Rentabilité et Efficacité Opérationnelle Maximales

- **Screening du bloc par RSS-NMR:** L'intérêt majeur de la RSS-NMR est de pouvoir analyser très rapidement une immense superficie directement depuis l'espace, sans éveiller de convoitises (mode Spy).
- **Réduction drastique des coûts de terrain:** L'utilisation exclusive des nœuds miniatures LA SISMIQUE À FAIBLE IMPACT (LOW IMPACT SEISMIC - LIS) permet de réduire jusqu'à 50% les coûts opérationnels de la sismique terrestre classique.
- **Complémentarité des échelles:** Le RSS-NMR offre une macro-cartographie à distance, ce qui permet de cibler les zones d'intérêt avant de déployer la sismique à nodes.

### Impact Environnemental Quasi Nul (Low Impact)

- **Zéro déforestation:** Les nœuds LA SISMIQUE À FAIBLE IMPACT (LOW IMPACT SEISMIC - LIS) sont transportés manuellement à pied. Il n'est plus nécessaire de couper des arbres pour créer des lignes de passage.
- **Préservation des sols:** L'absence totale de camions vibrateurs lourds élimine le risque de compactage des sols et préserve les écosystèmes.

### Précision et Résolution d'Imagerie Inégales

- **Détection directe vs indirecte:** Le couplage avec la RMN permet de détecter directement la signature propre des atomes d'hydrogène des fluides, fournissant une estimation immédiate de la porosité.
- **Ultra-haute densité de données:** Le faible coût unitaire et la miniaturisation permettent de déployer des dizaines de milliers de capteurs pour une résolution 3D/4D claire.

## 2. Feuille de route et arbitrages pour l'écosystème du Chaco paraguayen

- **Vibroseis:** Permet d'obtenir une image nette, mais les camions sont trop lourds et l'ouverture des pistes indispensables fragmenterait gravement l'écosystème.
- **Explosion:** À proscrire absolument. Les détonations provoquent des dommages irréversibles au sol, menacent les nappes phréatiques et la réglementation l'interdit.
- **RSS-NMR de surface:** Excellente méthode écologique pour estimer la porosité, mais sa profondeur d'investigation est insuffisante seule (calibration).

Recommandation Opérationnelle Finale :

# INVENTAIRE DES MOYENS SISMIQUES

1. Écarter définitivement et totalement l'usage des explosions par dynamite.
2. Utiliser la technologie spatiale RSS-NMR en Phase 1 comme outil principal de screening global de la concession pour déterminer avec précision les « Sweet points ».
3. Déployer la sismique sans fil à base de Nodes (type LA SISMIQUE À FAIBLE IMPACT (LOW IMPACT SEISMIC - LIS) ) en Phase 2 uniquement sur les zones de Sweet points. Les opérateurs se déplaceront exclusivement à pied.
4. Intégrer la diaggraphie NMR directement lors des phases de forages d'exploration ultérieurs pour analyser la saturation en profondeur.

**Conclusion Générale:** Dans le cadre ultra-sensible d'un parc naturel, la combinaison séquentielle RSS-NMR puis LOW IMPACT SEISMIC PAR NODE s'impose comme la seule approche viable, performante et écoresponsable pour cartographier les réserves profondes. La technique par explosion doit être rejetée pour des raisons écologiques évidentes, et la technique Vibroseis doit être écartée car elle s'avère techniquement trop risquée.