

Solutions de surveillance géodésique de surface de champs pétroliers et mines souterraines

Journée GEOPOS - 15 octobre 2015

- Introduction / objectif de cette présentation
- Problématique
- Processus mis en œuvre
- Rôle/place de la surveillance géodésique
- Exemples caractéristiques et problématiques typiques rencontrées

▪ Objectif

- Problématiques des **compagnies pétrolières et minières**
- **Déformation tridimensionnelle** et pas uniquement subsidence
- Solutions proposées et mises en œuvre par Fugro GEOID

▪ Clarification

- **Aide à l'exploitation** de champs d'hydrocarbures et non pas problématiques scientifiques
- **Contexte industriel** différent de celui de la recherche
- Acquisitions et traitements avec **fortes contraintes de temps** (coûts)
- **Adaptation à une situation existante** (réseau de référence mis en place progressivement donc non optimal, nécessité de maintenir la continuité des données historiques) et connaissance partielle du contexte (certaines données non accessibles)

Problématique : Type de déformation en jeu

Phénomène physique	Mécanisme en jeu
Karstification	Dissolution des carbonates
Retrait/gonflement des argiles	Modification du volume des sols
Glissement de terrain	Déplacements gravitaires
Subsidence tectonique	Enfouissement de la lithosphère
Subsidence thermique	Refroidissement de l'asthénosphère
Glaciation/déglaciation	Fonte du pergélisol
Volcanisme	Effondrement des coulées de lave
Extraction minière	Retrait de matière en profondeur
Extraction d'eau	Retrait de matière en profondeur
Extraction d'hydrocarbures	Retrait de matière en profondeur

Problématique : Conséquences possibles

▪ Exemples de forte subsidence

- **Willmington** (Californie, 1947-61)

Subsidence 8m. Contrainte de cisaillement à l'origine de brusques déplacements horizontaux (3.6m) et failles en surface (0.5m) (équivalent à un séisme de magnitude 5,1)

- **Coalinga** (Californie), TDT induit M=6.7m

- **Catoosa**, USA, TDT induit M=4.7 et réservoir affecté

- **Lagunillas**, Venezuela, subsidence 4.1m

- **Ekofisk**, Norvège, subsidence 3.0m

- **Inglewood**, USA, 2.0m, déplacement horizontal 0.7m

- **Surakhani**, Azerbaïdjan, subsidence 3.0m

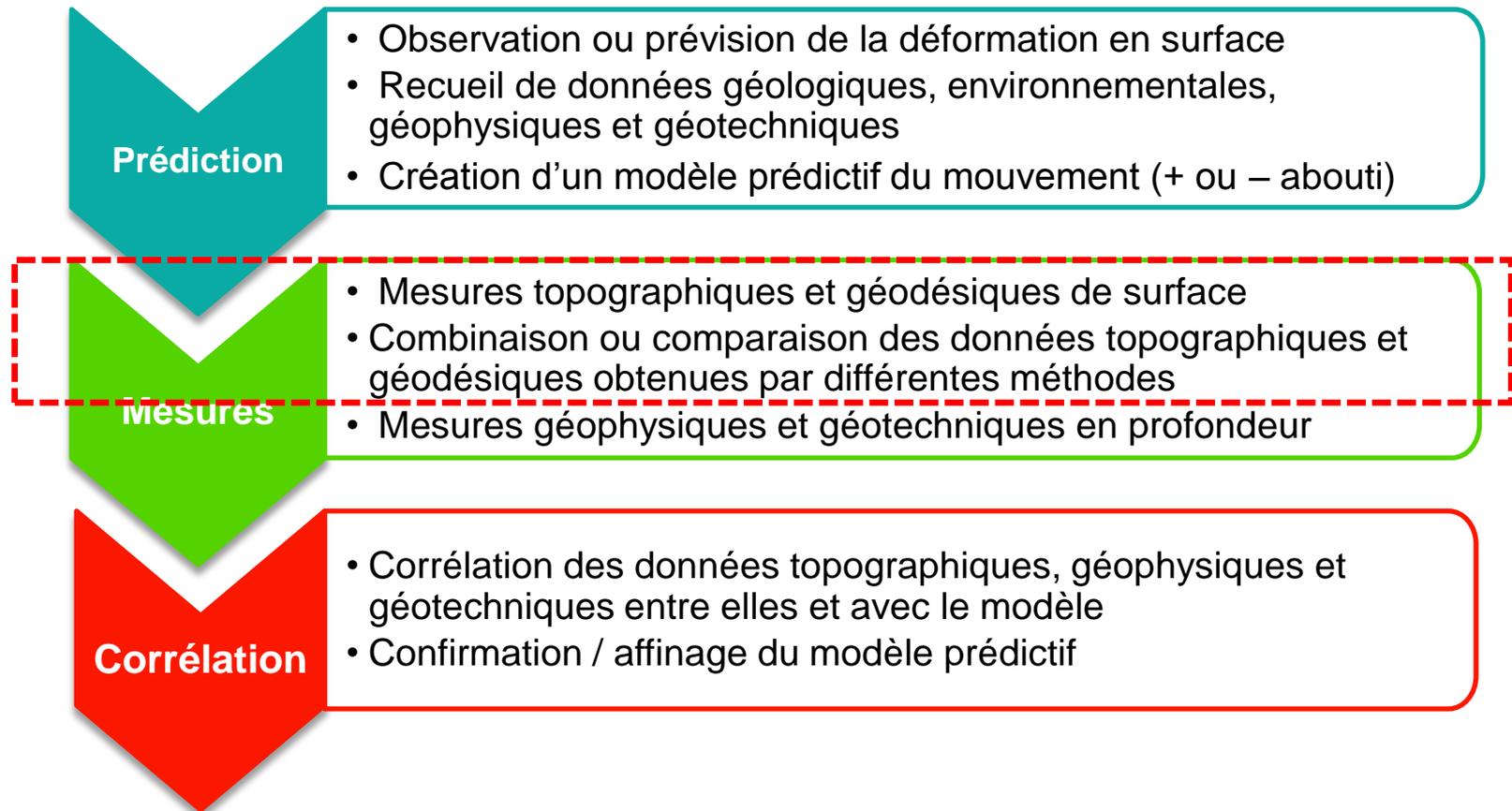
- Buena Vista, USA, 2.3m

▪ Conséquences:

- Dégâts importants sur la plupart des infrastructures: Puits, pipelines, jetées, immeubles, rues, ponts, évalués à plus de 10 M\$
- Arrêt de la production sur plus de 200 puits,
- Dégâts sur 26 puits, unités de pompage, cuves de stockage
- Destruction des puits d'une partie du réservoir
- Ruptures de trains de tubage et pipelines
- Rehaussement des plateformes
- Rupture de tubages sur plusieurs puits et mouvement d'une faille conduisant à la rupture d'un barrage - réservoir

- **Prévision des risques**
 - Anticipation pour éviter ou mitiger les conséquences négatives de la déformation en surface
 - Risques prévus (modèle), avérés (accident) ou obligation légale (réglementation)
- **Aide à la gestion des champs/sites**
 - Gestion de l'exploitation (injection d'eau ou de gaz, durée d'utilisation des puits...), en complément avec des données géophysiques (pression à l'intérieur du réservoir etc.)
 - Ajustement des volumes injectés ou extraits
 - Calibration du modèle géomécanique

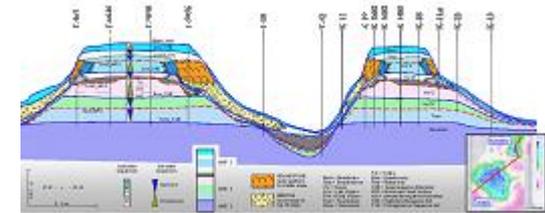
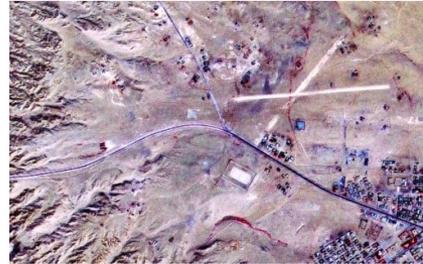
Séquence de traitement : Problématique de déformation



Recueil de données

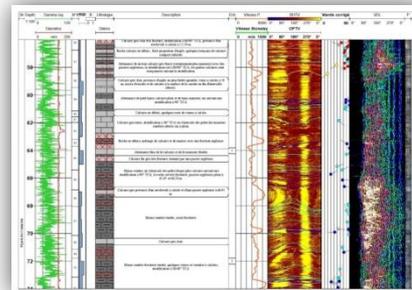
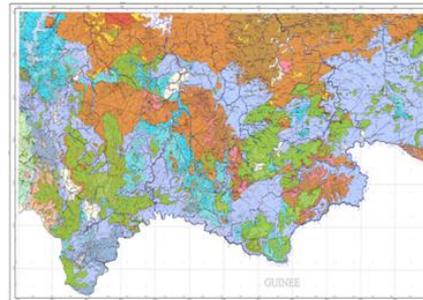
Information régionale

- Images satellites
- (Landsat, Aster, Spot, Ikonos etc.)
- Carte tectonique
- Cartes géologique et hydrogéologique
- Carte gravimétrique
- Carte topographique
- Données hydrologiques et météorologiques (océanographiques en mer)

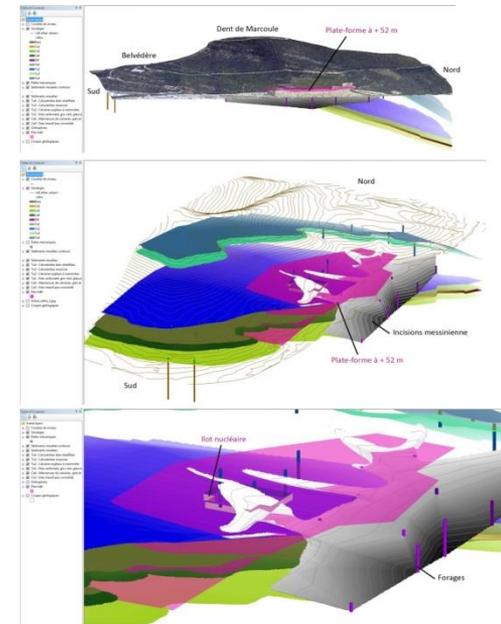


Données locales existantes

- Logs de forages
- Enregistrement sismiques
- Coupes géologiques ou modèle 3D
- Données environnementales (pluviométrie, piézométrie etc.)
- Reconnaissance sur le terrain (topographie, géologie, hydrologie, infrastructures)



© Fugro

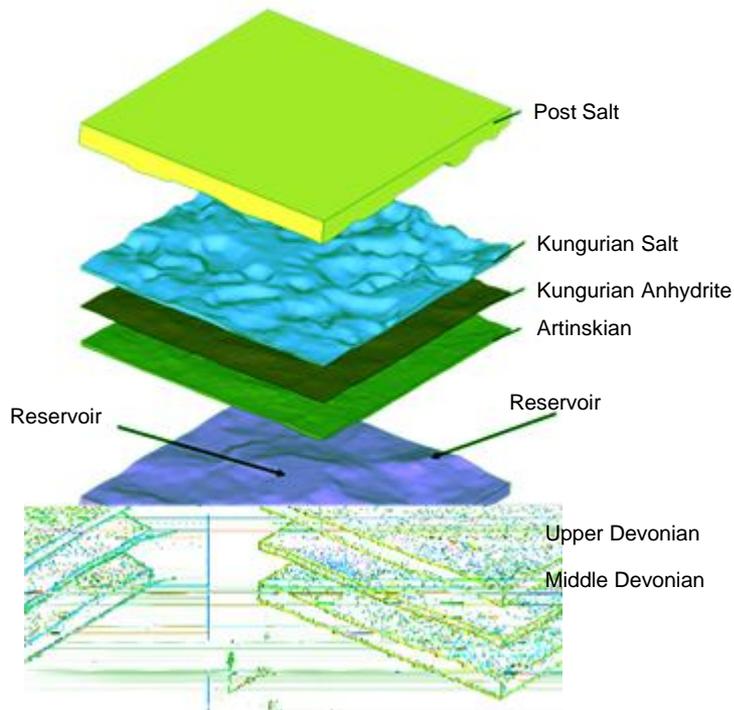


© Fugro

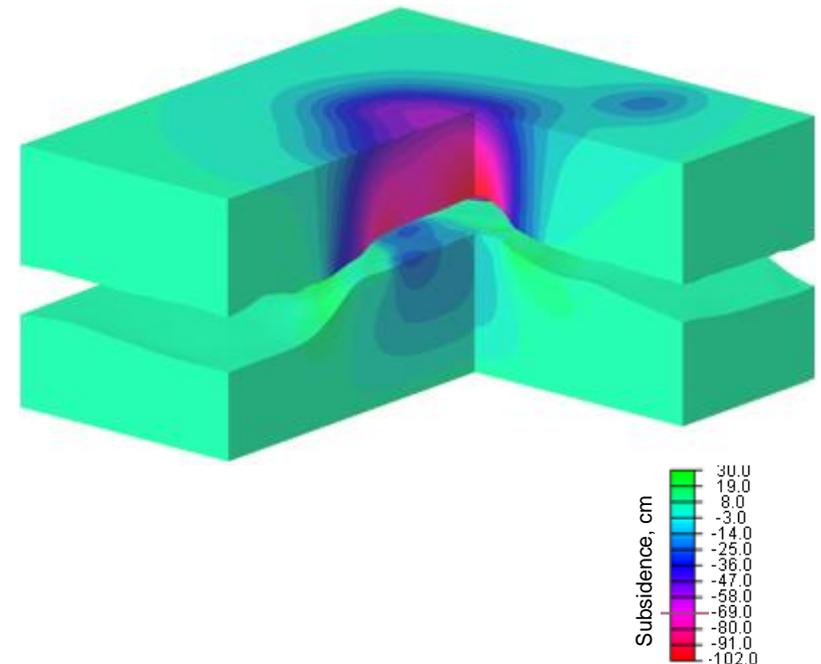
Création d'un modèle prédictif

Principe

- Le modèle géomécanique est renseigné avec les propriétés des sols dérivées des logs des puits de forage: densité, ratio de Poisson, module de Young, pression interstitielle, résistance, angle de friction
- Le modèle simule les déformations du sous-sol en utilisant l'historique correspondante et la prévision de la variation de pression dans le réservoir



Subsidence modélisée



Eventail et ordre de mise en oeuvre des techniques disponibles

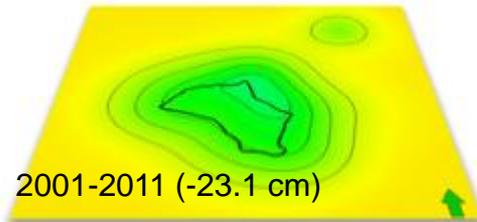
Zone d'intérêt	Type de mesures
Mesures aériennes globales (nuages de points)	InSAR
	LiDAR aéroporté
	Photogrammétrie et corrélation d'images optiques
Mesures terrestres globales (nuages de points - versants)	LiDAR terrestre (Laser scanner 3D)
	InSAR terrestre
	Corrélation d'images optiques
Mesures terrestres discrètes (points névralgiques ou représentatifs)	GPS
	Nivellement géométrique et tachéométrie (historique)
	Transferts de masse: micro-gravimétrie
	Séismes induits: micro-sismologie
Mesures en sous-sol ponctuelles :	Extensomètres, inclinomètres, fissuromètres, accéléromètres
	fibres optiques
	Capteurs d'environnement : piézomètres, pluviomètres, humidité, évapotranspiration (tour à flux...) Résonance Magnétique Protonique...

Calibration du modèle prédictif

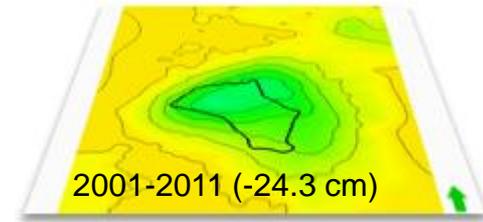
■ Calibration du modèle

- Les mesures de déformation en surface sont utilisées pour confirmer la crédibilité du modèle

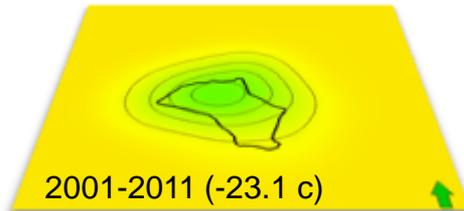
Prévisions



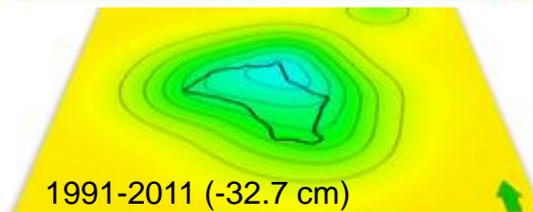
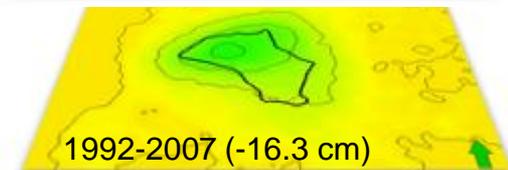
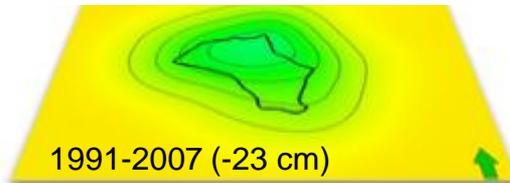
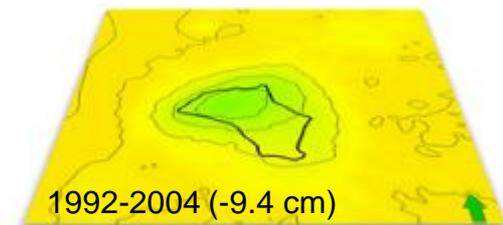
Observations



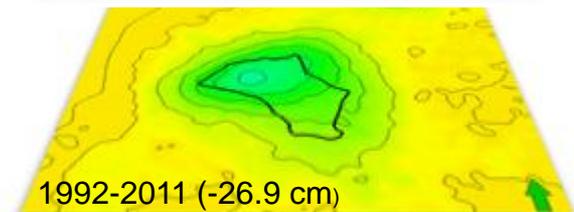
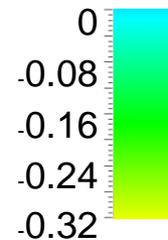
Prévisions



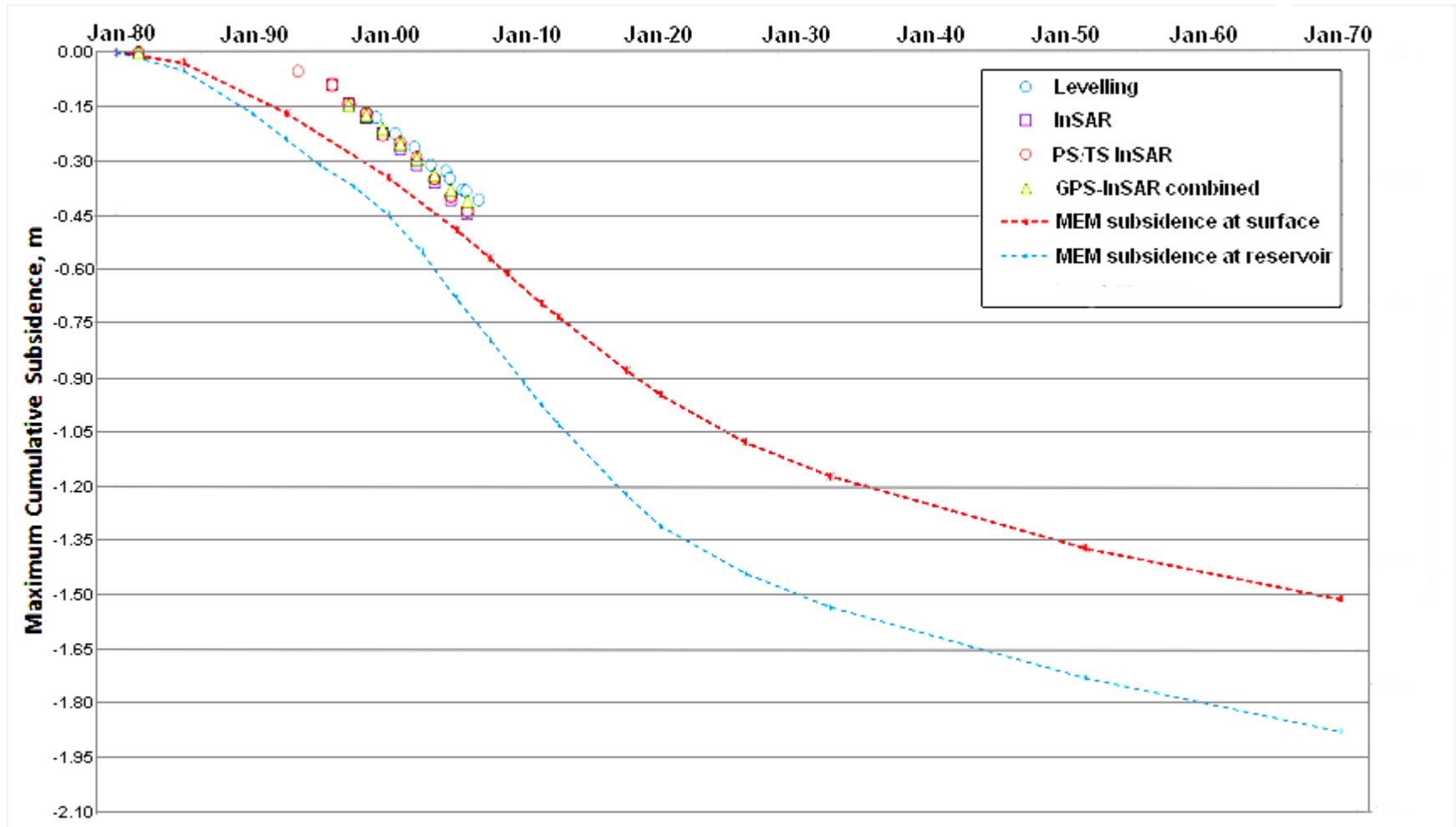
Observations



Subsidence, m:



- Ajustement du modèle prédictif
 - Suivi des écarts entre prévisions et observations



**PENINSULE
ARABIQUE**

ASIE CENTRALE

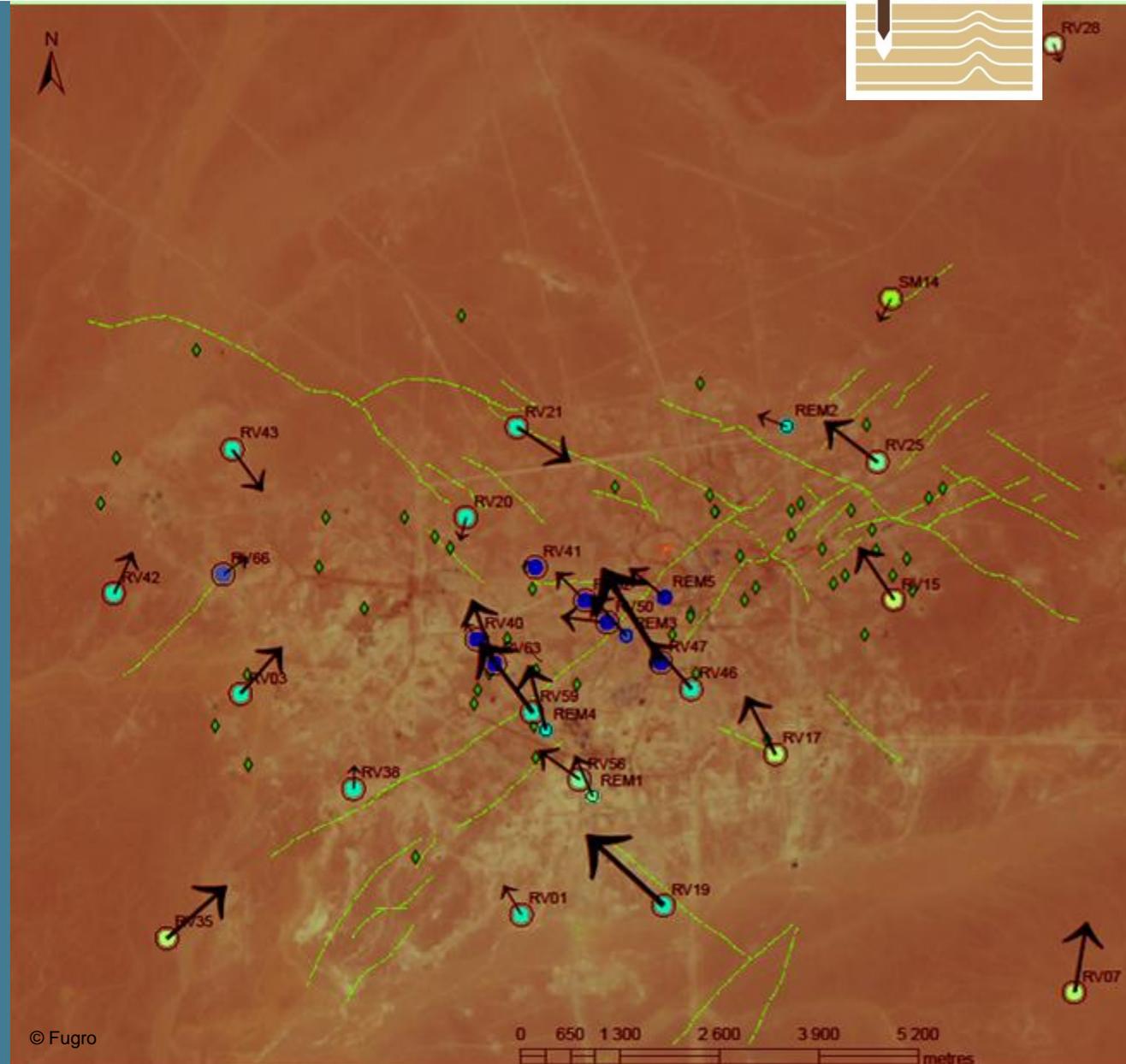
LANGUEDOC

**GOLFE ARABO-
PERSIQUE**

**DETROIT DE
MACASSAR**

MER DE CHINE

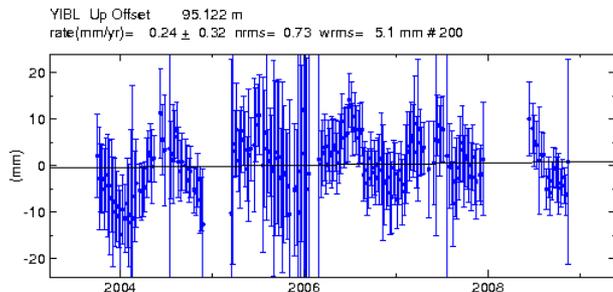
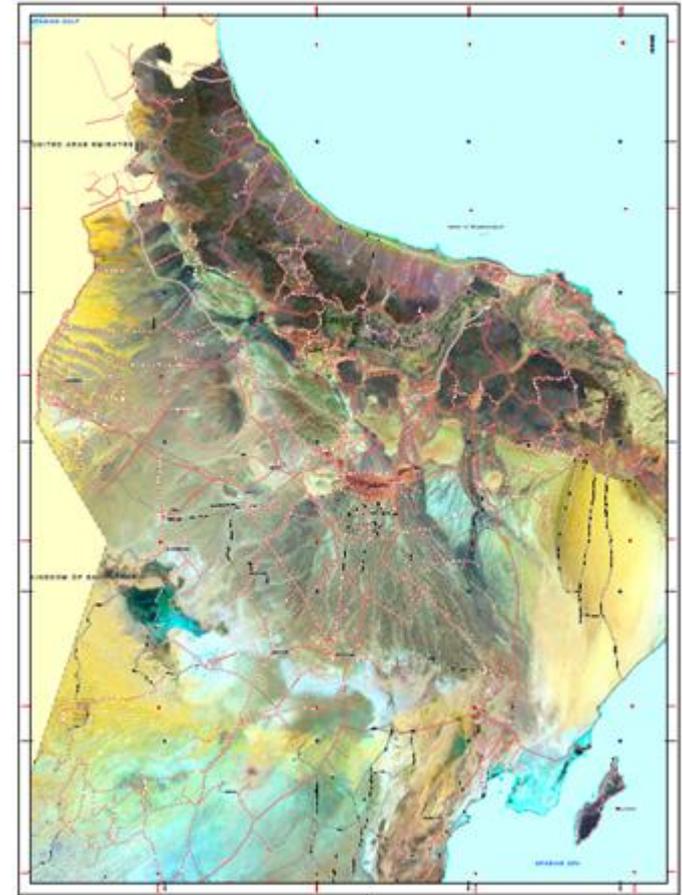
Champ pétrolier et gazier Péninsule Arabique (GPS et nivellement)



Champ pétrolier et gazier dans la péninsule Arabique

Contexte

- Geomonitoring / surveillance géodésique de 3 champs majeurs de production d'hydrocarbures situés au NE du désert de Rub' al Khalien en Oman.
- L'objectif des mesures (GPS, nivellement, InSAR, ainsi que sismicité et micro-gravimétrie) est de suivre/surveiller la réponse du terrain en surface à l'exploitation du champ, en particulier l'injection de vapeur d'eau et le pompage de pétrole et de gaz
- Subsidence maximale 2 à 9 cm/an selon les champs
- Climat désertique protégé: pas de végétation, régime météorologiques stable
- **Le programme initial a été révisé après qu'un tubage de puits ait cassé, entraînant une pénurie de gaz dans le pays**



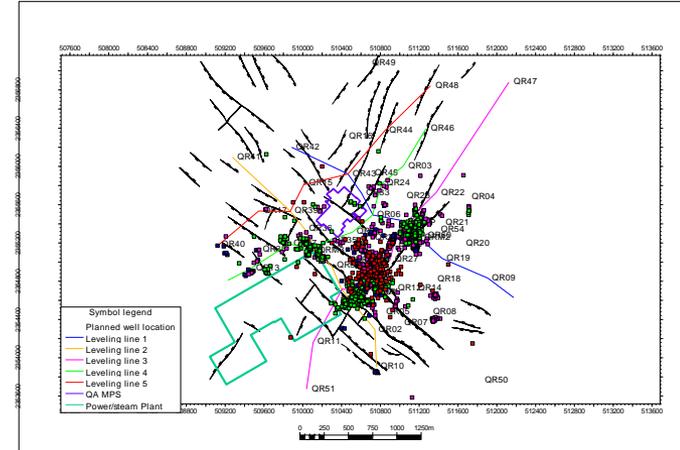
GMT 2008 Dec 5 11:23:17 p: 526

© Fugro

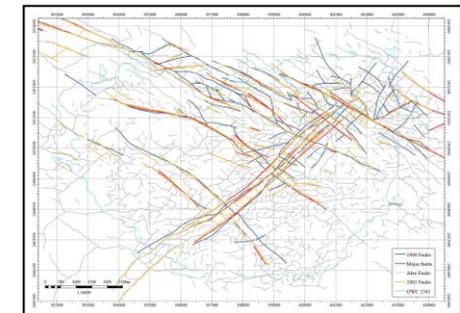
Champ pétrolier et gazier dans la péninsule Arabique

Problématiques

- **Subsidence lente**
- **Configuration de monitoring historique non optimisée:** matérialisation, emplacements, nombre et géométrie des points de référence, réalisation du référentiel géodésique imprécise...
- **Limites du bol de subsidence incertaine :** stations de référence GPS et nivellement affectées par des déformations (horizontales et verticales)
- **Impossibilité de ne compter que sur des stations de références locales:** contraintes liées à l'utilisation de stations très éloignées
- **Injections de vapeur d'eau,** variations non linéaires de la déformation (alternance de phases de subsidence et de gonflement)
- **Nombreuses failles** peu profondes affectant les déformations en surface (déformations horizontales non radiales)
- **Périodes de scintillement ionosphérique**
- **Ecarts entre les différentes techniques:** estimation des incertitudes objectivement surestimée, entraînant la méfiance du gestionnaire



	BAS1
$\Delta N_{2010.9-13.1}$ (m/yr)	0.0016 +/- 0.0002
$\Delta E_{2010.9-13.1}$ (m/yr)	0.0001 +/- 0.0003
$\Delta H_{2010.9-13.1}$ (m/yr)	-0.0005 +/- 0.0003



Champ pétrolier et gazier dans la péninsule Arabique

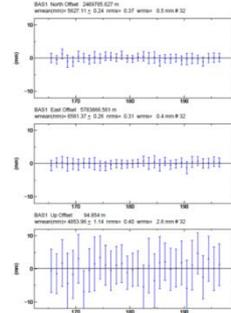
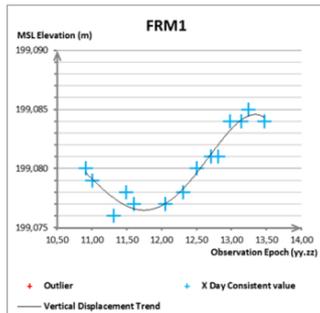
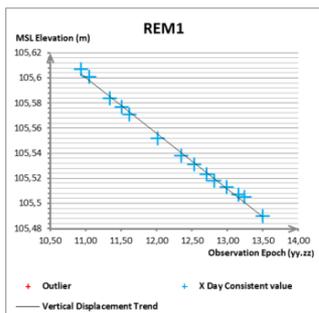
Travaux

- **Optimiser** le programme d'observation GPS, **effectuer** les mesures, leur post-traitement et **analyser** les mouvements du terrain en surface
- Rédaction de rapports de calculs résultats, d'analyse GPS / nivellement et de recommandations

Horizontal displacement magnitude (m)	Subsidence magnitude (m)	Subsidence magnitude reliability	Subsidence code
0.003	-0.001		0
0.002	-0.001		0
0.004	0.002		0
0.009	-0.003		0
0.005	0.003		0
0.008	-0.001		0
0.008	-0.002		0
0.003	0.001		0
0.005	0.005	30 %	1
0.004	0.005	31 %	1
0.004	0.005	35 %	1
0.006	-0.008	100 %	-1
0.011	-0.025	100 %	-5
0.003	0.000		0
0.010	0.014	100 %	2
0.009	0.003		0

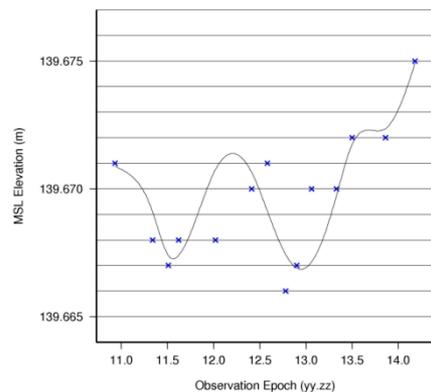
Horizontal displacement magnitude column:	Subsidence code column:
0 - 2 mm	Stable position
2 - 4 mm	Displacement
4 - 6 mm	Displacement +
6 - 8 mm	Displacement ++
8 - 10 mm	Displacement +++
> 10 mm	Displacement ++++

Subsidence code column:	
4	Uplift+++ (values between +28mm & +60mm)
3	Uplift++ (values between +20mm & +28mm)
2	Uplift+ (values between +12mm & +20mm)
1	Uplift (values between +4mm & +12mm)
0	Stability (values between -4mm & +4mm)
-1	Subsidence (values between -12mm & -4mm)
-2	Subsidence+ (values between -20mm & -12mm)
-3	Subsidence++ (values between -28mm & -20mm)

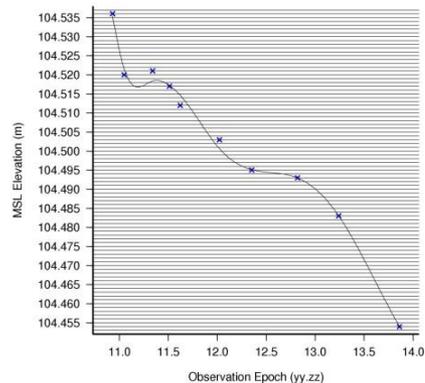


© Fugro

QRM3



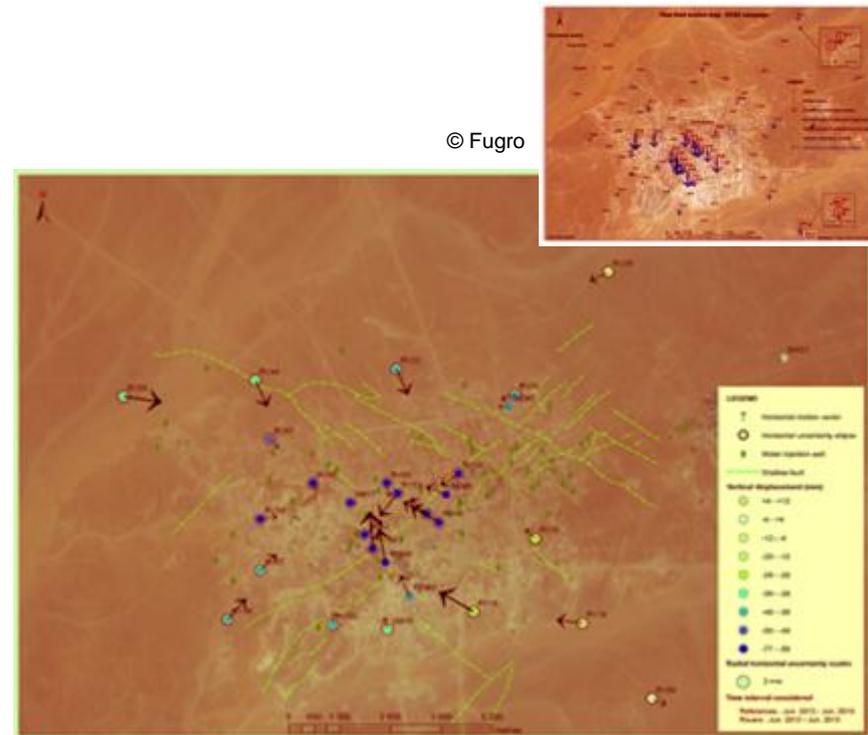
RV17



© Fugro 2014 Jan 17 12:58:35

© Fugro 2014 Apr 23 17:16:36

© Fugro



Champ pétrolier et gazier dans la péninsule Arabique

Solution

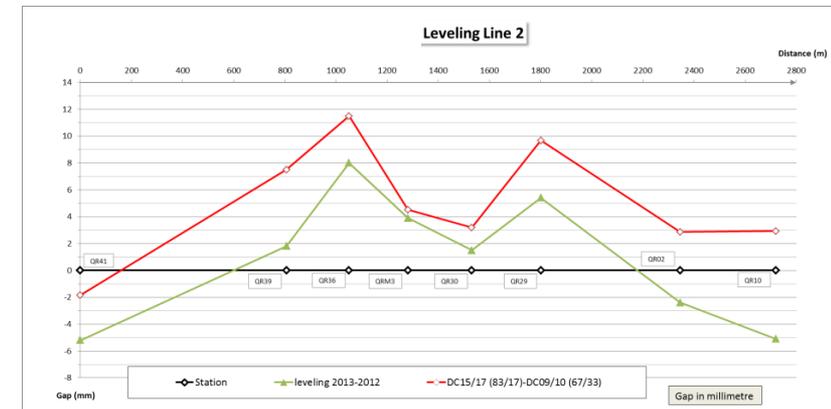
- **Augmentation du réseau de référence** très au delà de la zone d'intérêt pour redondance et géométrie
- **Redétermination** du réseau de référence local (présupposé instable) à chaque campagne
- **Augmentation** des durées des sessions des campagnes épisodiques
- **Réseau de stations épisodiques contraint** sur les stations permanentes (pour minimiser la décorrélation d'origine troposphérique)
- **Optimisation des réseaux** GPS et nivellement par rapport aux failles, puits d'injection etc. dans les champs objet d'injection de vapeur d'eau
- Compensation du réseau de nivellement sur les stations GPS (difficulté théorique)
- Optimisation des paramètres de calcul

Enseignement

- **Ecarts résultats GPS-InSAR-Nivellement** : synchronisation des acquisitions
- **Ecarts INSAR selon les intervalles de temps considérés** : déformation non linéaire due à l'injection/failles, difficulté à discriminer la composante verticale lorsqu'elle est combinée avec une composante horizontale

Offshore Survey Division – Reference Stations

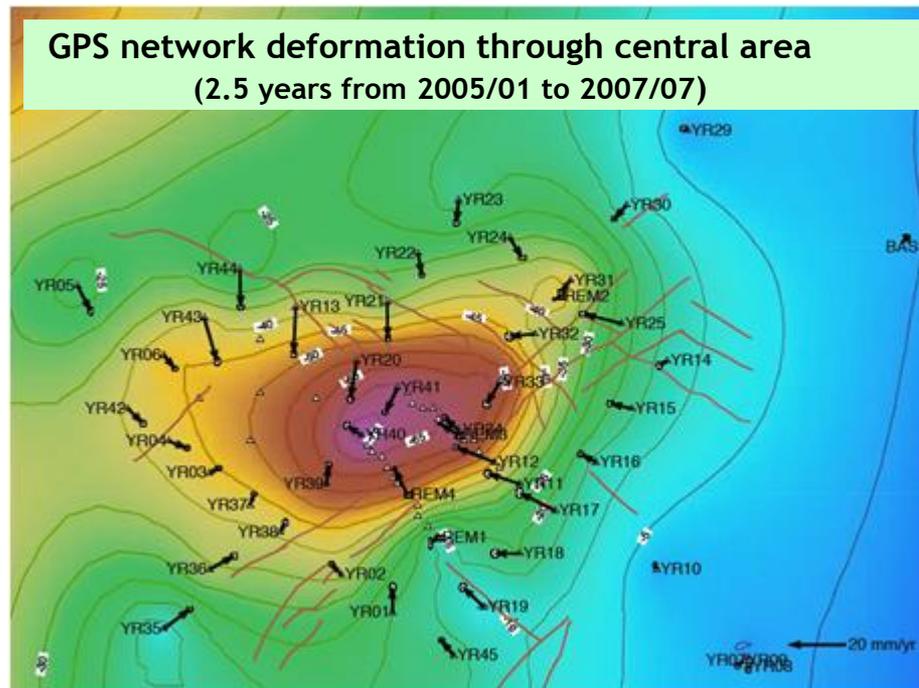
Quality plots



Champ pétrolier et gazier dans la péninsule Arabique

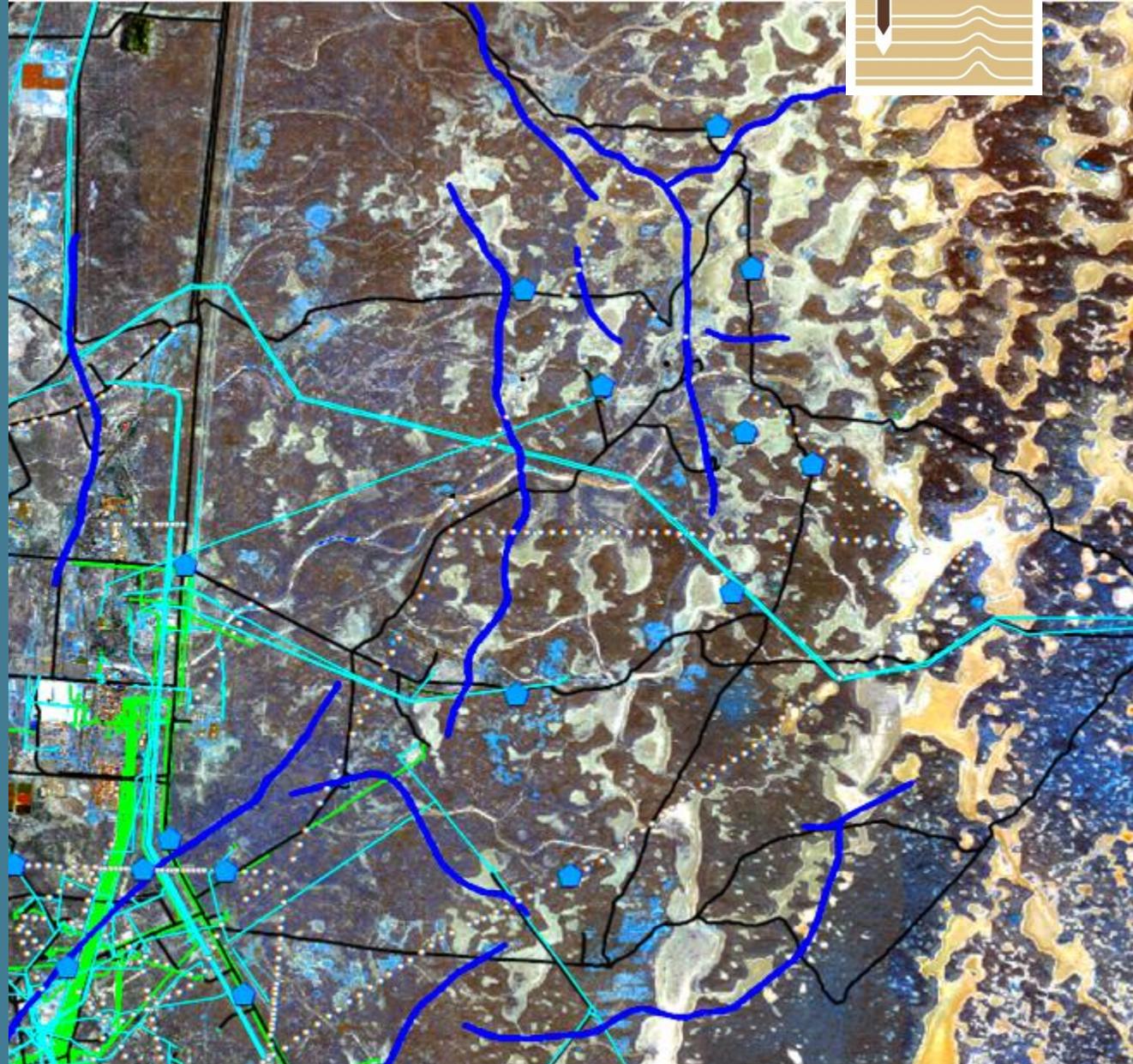
Perspectives et limitations

- **Amélioration de l'estimation des incertitudes GPS et nivellement.**
- **Intégration GPS/nivellement et InSAR en amont** : synchronisation des différentes acquisitions, détection et investigation des écarts hors tolérance en amont, plutôt que d'essayer d'analyser les écarts a posteriori pour fusionner les différents résultats.
- **Difficulté de vaincre les réticences des utilisateurs** (problème de toutes les vérifications qui nécessitent de ne pas utiliser une partie des données disponibles, donc de sacrifier la précision) : l'estimation des incertitudes est délicate pour toutes les techniques



Champ sans injection
de vapeur d'eau

Champ pétrolier Asie centrale (InSAR)



Champ pétrolier en Asie Centrale

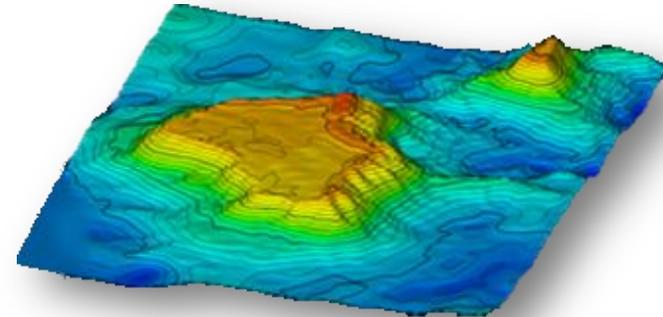
Contexte

- L'objectif est de **surveiller la réponse du terrain en surface et en profondeur à l'exploitation du champ pétrolier**
- Subsidence maximale 3 cm/an
- Proche de la mer Caspienne: steppe avec solontchaks, périodes pluvieuses, vent, fort gradient de T°C, épisodes de submersion
- **Le programme a été motivé par (1) le besoin de contrôler la production, (2) l'autorité de régulation (séismes induits)**



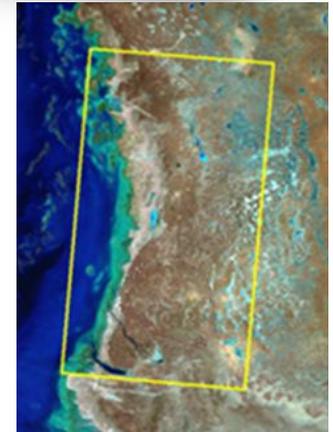
Audit initial

- **Evaluer** la configuration de geomonitoring initiale, **proposer** différents scénarii alternatifs et le moyen d'**optimiser** leur mise en œuvre à partir de la configuration existante (assurant notamment la continuité des données historiques)
- Exigences: précision, paramètres à monitorer, redondance (validations indépendantes)



Travaux

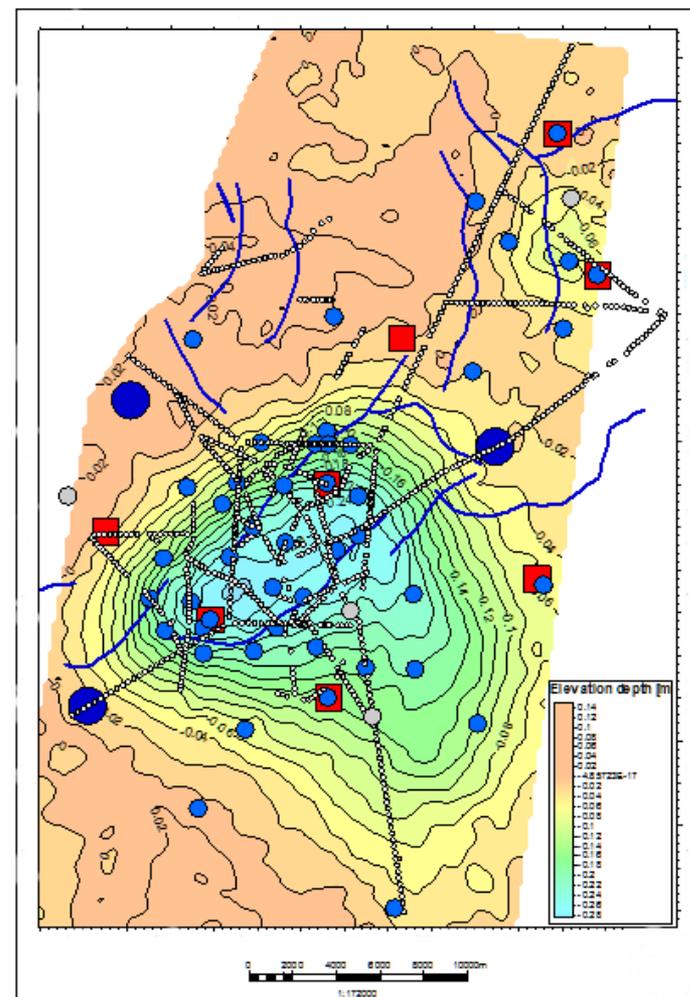
- **Définition des méthodes** : protocole d'acquisition de données, post-traitement, analyse combinée des différentes techniques et intégration (en aval)
- **Post-traitement** des données GPS, nivellement et micro-gravimétrie
- **Intégration** des résultats des différentes techniques (en aval)
- **Feuille de route suivie** à l'exception du calendrier (retard) et de la non-intégration des techniques en amont (indépendance privilégiée à la précision)



Configuration préexistante

- Réseau de nivellement dense pour subsidence et monitoring des failles
- GPS pour déformation tridimensionnelle et contrainte horizontale et compression/tension
- Sismographes

- Deformation map: 2001-2012
- Shallow faults
 - Leveling stations
 - GPS reference stations
 - GPS regular stations
 - GPS lost stations
 - Surface seismic stations



Problématiques

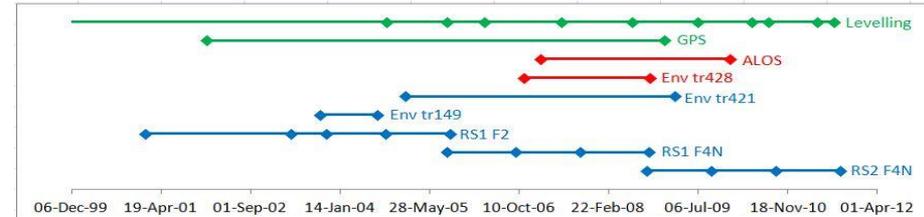
- Similaires au cas de figure de la péninsule Arabique (postulats, références GPS et nivellement instables horizontalement et verticalement etc.)

Problématiques spécifiques

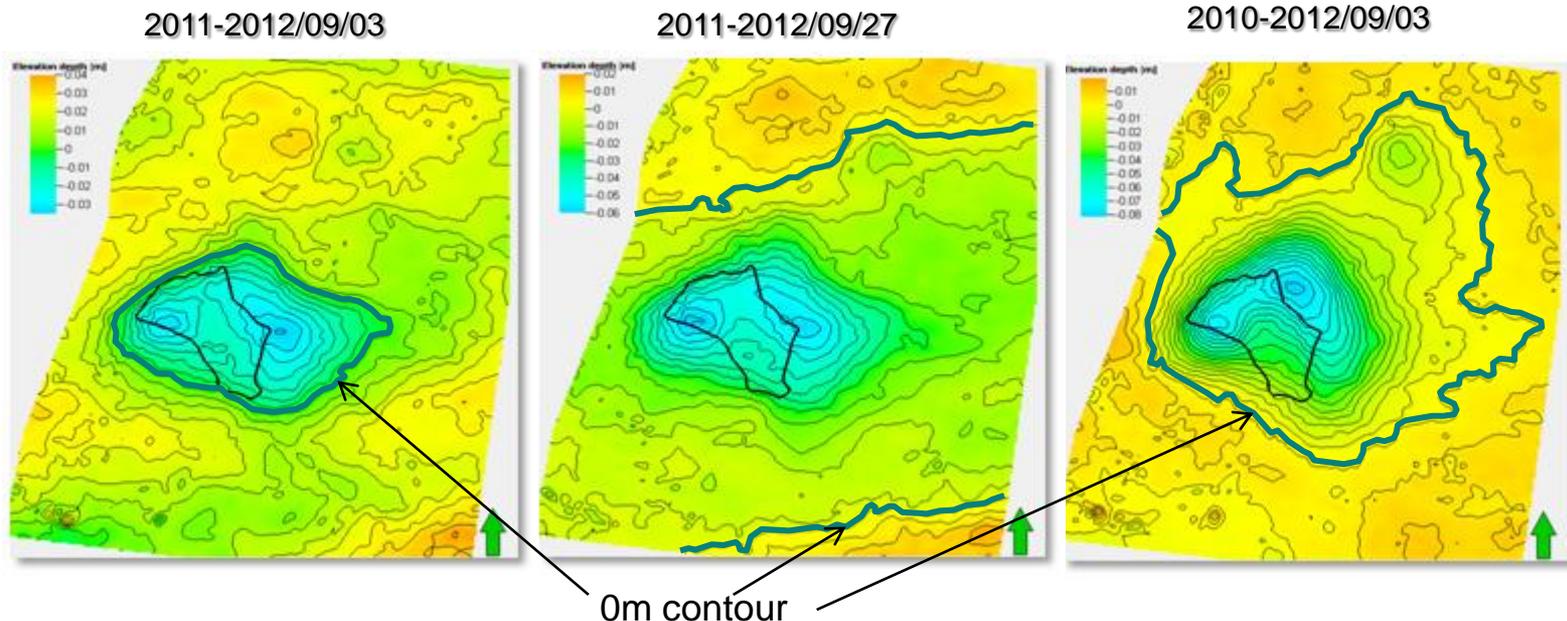
- **Variabilité du régime météorologique** (mer Caspienne à proximité) : affecte le GPS, l'InSAR, la micro-gravimétrie
- **Décorrélacion spatiale depuis les stations de référence** : variation spatiotemporelle du délai troposphérique
- **Limites du bol de subsidence incertaine**: InSAR affectée par des artefacts atmosphériques
- **Difficultés environnementales**: submersions, conditions difficiles (vent, neige, variations de températures)
- **Failles actives jusque récemment** (années 1990s), réactivation possible due à des micro-événements sismiques induits par l'exploitation
- **Doute et scepticisme du client** : écarts InSAR-GPS-nivellement, biais des premières mesures InSAR, surestimation des précisions du GPS, du nivellement, de l'InSAR, ne permettant pas d'envisager l'intégration des différentes techniques en amont pour éviter d'avoir des incohérences lors de la fusion des résultats

Difficultés InSAR

- Paires DifSAR sujettes aux **artéfacts atmosphériques**
- **Léger décalage de la position apparente du bol** de subsidence, effet de la déformation horizontale sur la LoS descendante oblique
- Utilisation de PSI et TSD utilisées pour réduire l'impact des artéfacts atmosphériques
- Données d'orbites ascendantes et descendantes combinées pour investiguer la déformation horizontale.



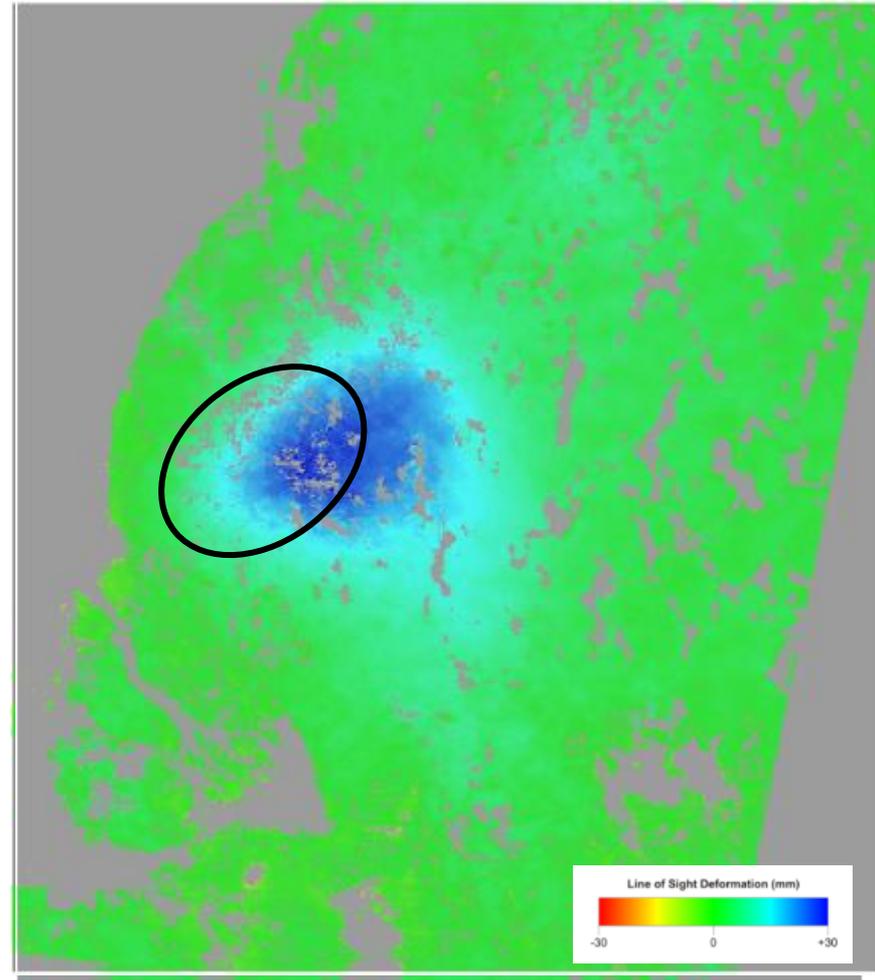
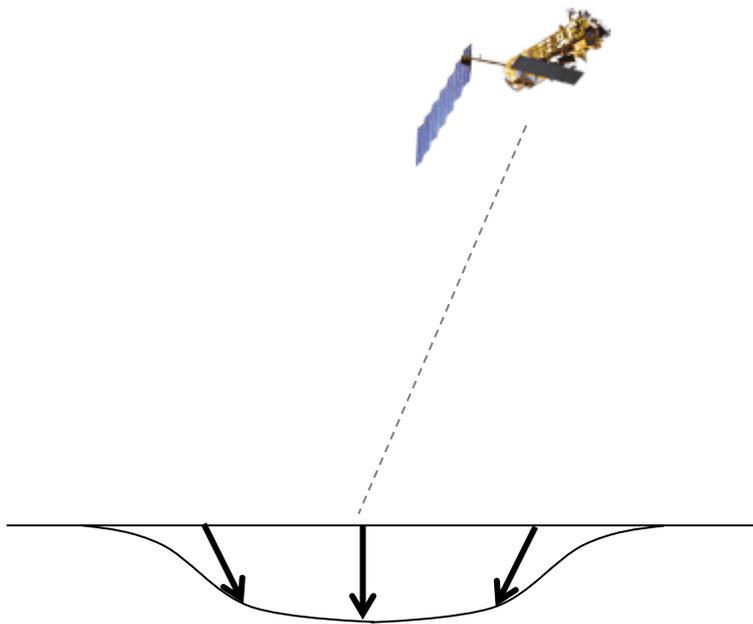
GPS/levelling
 Ascending InSAR
 Descending InSAR



Champ pétrolier en Asie Centrale

Décalage apparent du bol de subsidence

- Le bol se déplace d'ouest en est quand l'orbite (LoS) passe de légèrement ascendante à très ascendante puis descendante.

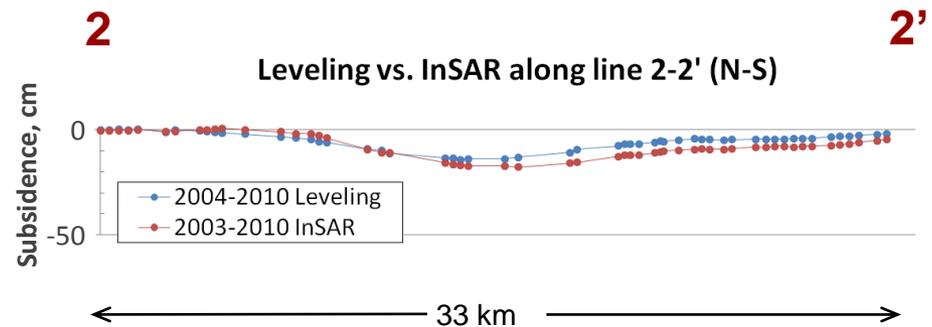
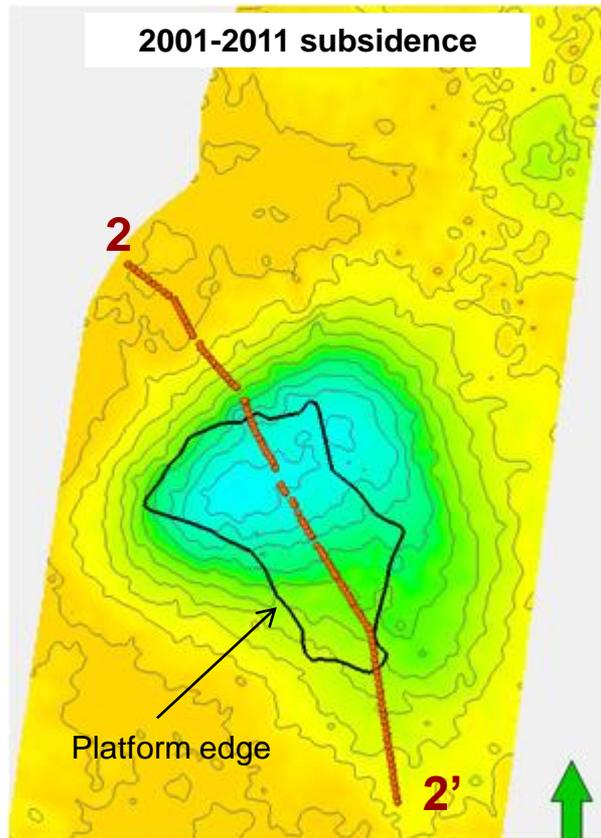


Le bol de subsidence apparent bouge quand la LoS change

Champ pétrolier en Asie Centrale

Résultats GPS – nivellement – InSAR peu concordants

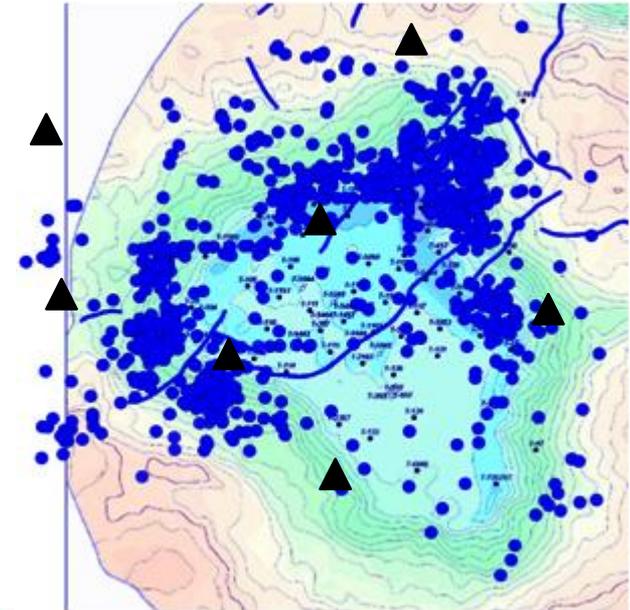
- Biais InSAR (LoS, atmosphère)
- Imprécision GPS (réseau, sessions, méthode)
- Imprécisions de nivellement (méthode, principe, pas de compensation...)



Champ pétrolier en Asie Centrale

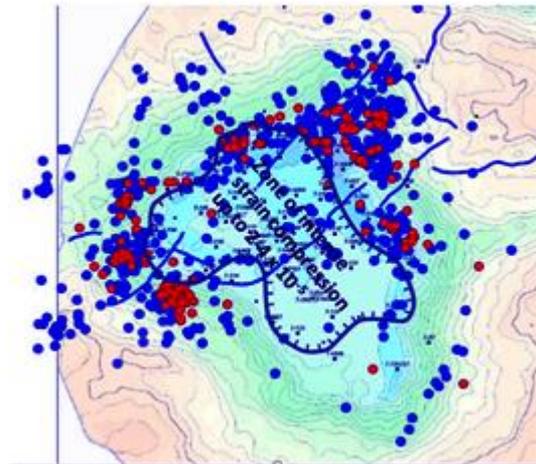
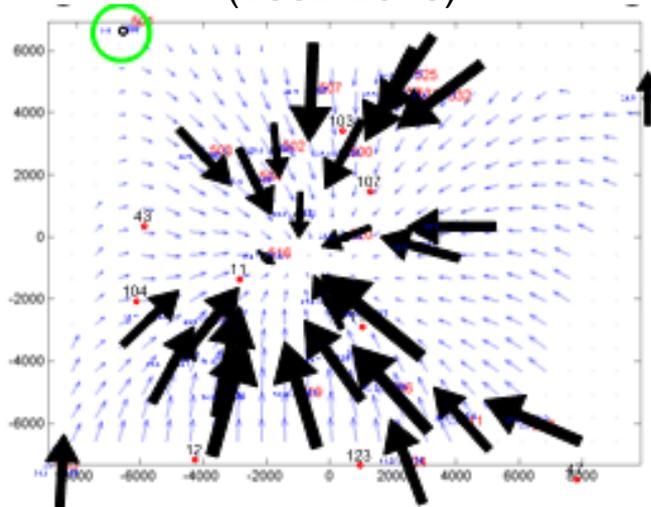
Sismologie

- **Monitoring continu** : enregistrement des tremblements de terre locaux (induits) et régionaux
- Réseau de sismographes (10 stations)
- **Corrélation avec GPS géodésique** (zones d'extension et de compression)
- **L'instabilité horizontale des points d'appui affecte la mesure des déplacements absolus et relatifs** (zones de compression, tension, de part et d'autre des failles)



Stations de sismicité et épicesentres des séismes induits

(2002-2010)



Champ pétrolier en Asie Centrale

Solutions

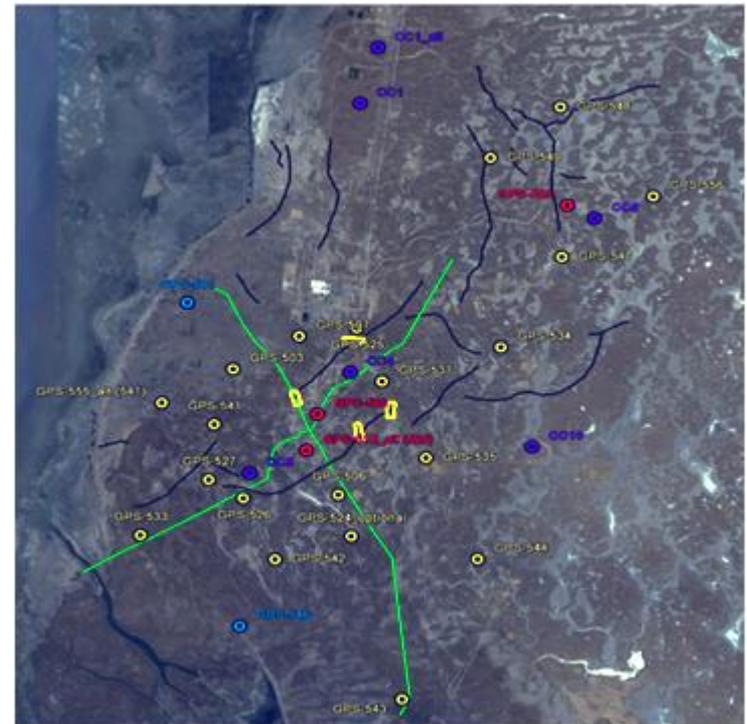
- Similaires au cas de figure désert chaud mais variation spatio-temporelle du ZTD plus importante

Enseignement

- **Ecart résultats GPS-InSAR-Nivellement** : synchronisation insuffisante pour combiner avec succès les différentes techniques
- **INSAR** : orbites montantes et descendantes avec géométrie symétrique, ou mieux, combinaison avec GPS

Perspectives et limitations

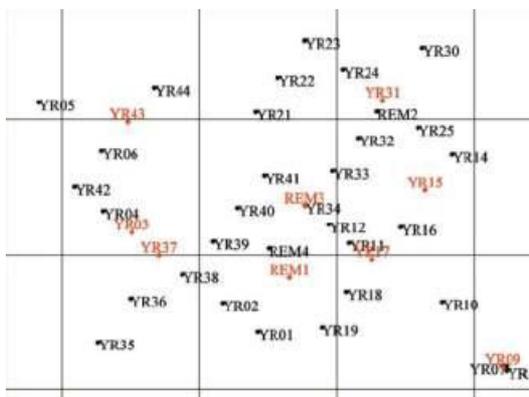
- **Similaires au cas de figure de la péninsule Arabique** : en outre, pour la micro-gravimétrie, récupération des données environnementales (eau de pluie) et de production (volumes injectés et extraits)
- **InSAR augmentée** : PSI avec différentes images maîtresses, SBAS, modèles atmosphériques, données satellitaires (fraction de vapeur d'eau) ou combinaison avec GPS
- **GPS et nivellement**: compensation par moindres carrés combinant les deux techniques



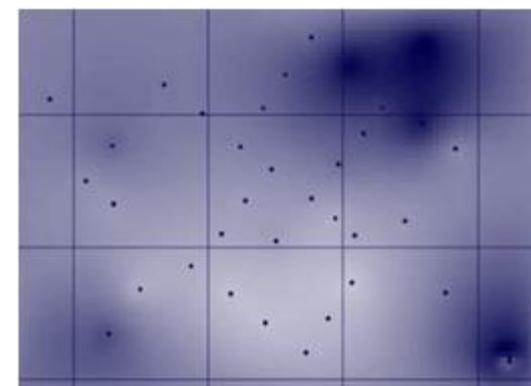
Champ pétrolier en Asie Centrale

Combinaison InSAR - GPS

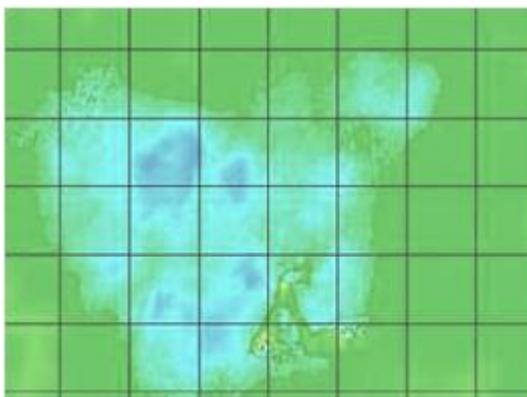
- Utilisation du GPS pour estimer le délai zénithal
- Interpolation en grille de la carte des déformations GPS (LSC / krigeage)
- Différence des 2 cartes de déformation
- Calcul de la différence pour extraire la composante atmosphérique
- Soustraction de l'image résultante des données InSAR pour améliorer la précision des mesures de déformations



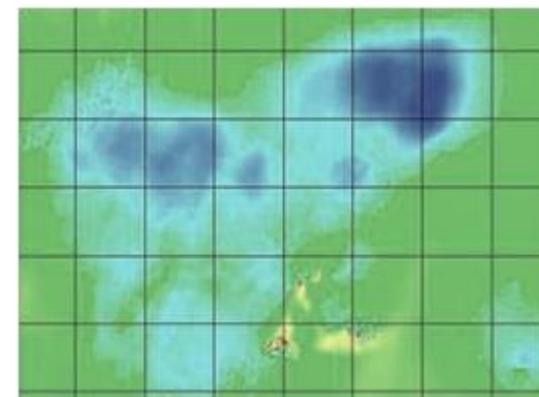
Stations GPS



Phase atmosphérique



Déformation DInSAR



Déformation DInSAR corrigée

© Fugro



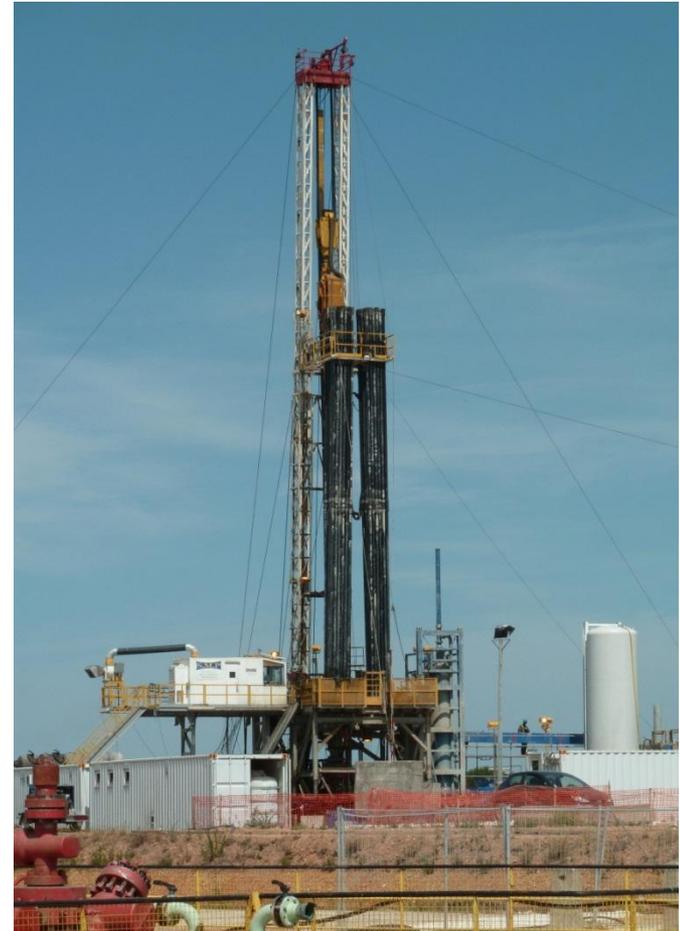
Saline souterraine de Vauvert, Languedoc

(GPS, nivellement, InSAR, LiDAR, micro-gravimétrie)

Saline souterraine de Vauvert, Languedoc

Contexte

- Saline en exploitation : profondeur 2500 m, injection d'eau, extraction de saumure (4 puits simultanément)
- Exploitation utilisée comme site d'expérimentations
- Subsidence maximale 3 cm/an, bol 8-9 x 6-7 km, en extension
- Nivellement, InSAR, LiDAR, GPS, micro-gravimétrie
- Le programme a été motivé par (1) l'obligation légale (nivellement IGN), (2) la possibilité de pouvoir disposer de tous les types de données

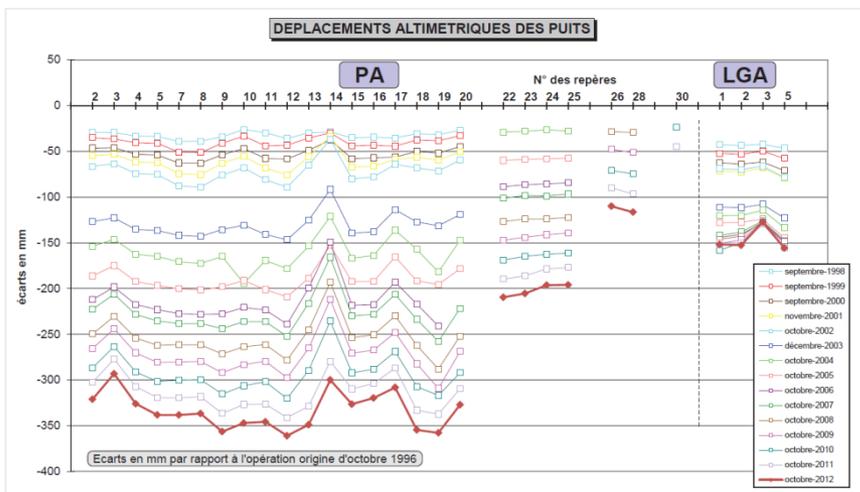


© Fugro

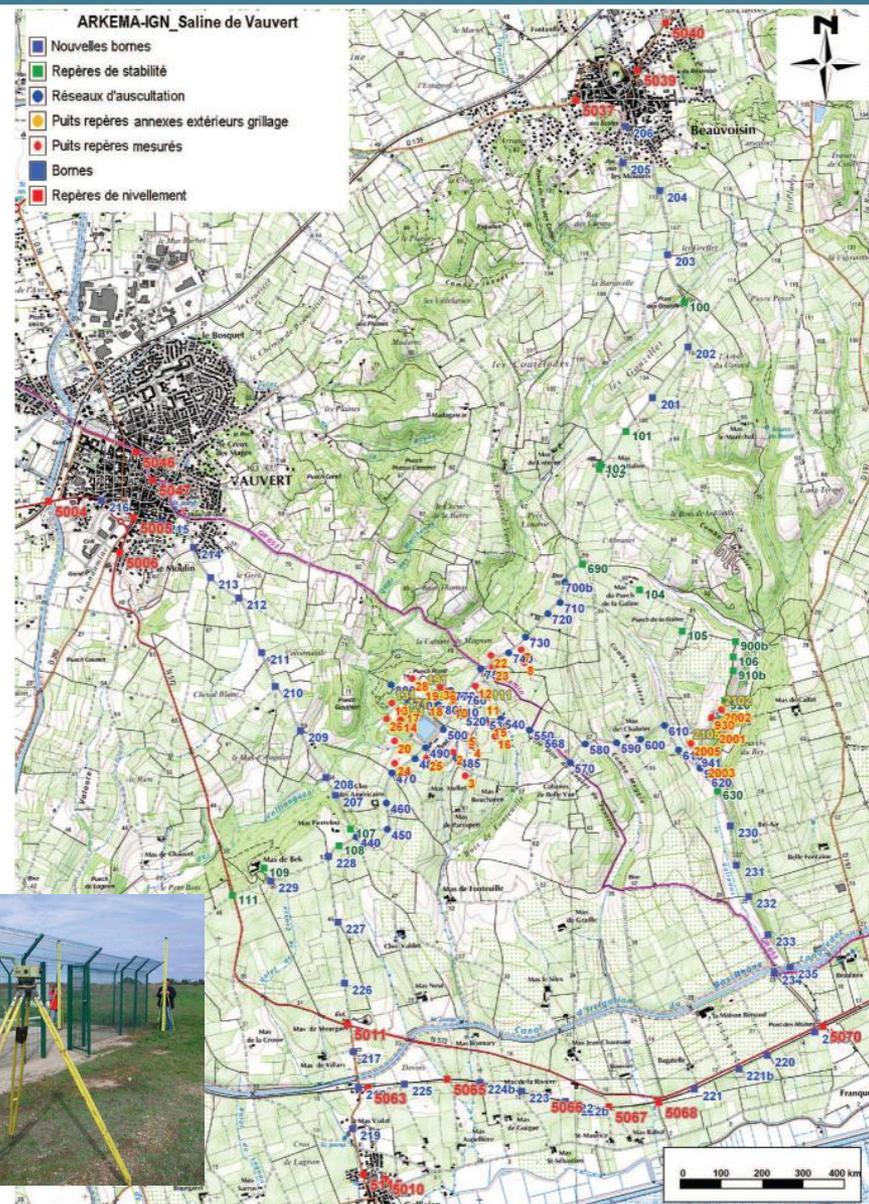
Saline souterraine de Vauvert, Languedoc

Nivellement

- Annuel, effectué par l'IGN (automne)
- A l'origine, réseau d'auscultation entièrement dans le bol
- Actuellement, un seul point de référence au sud
- Séquences complémentaires aux autres techniques (dalles de puits, PS identifiables...)
- Perspectives: 2 points présumés stables distants l'un de l'autre, plus éloigné du bol
- Subsidence maximale 2.5 cm/an



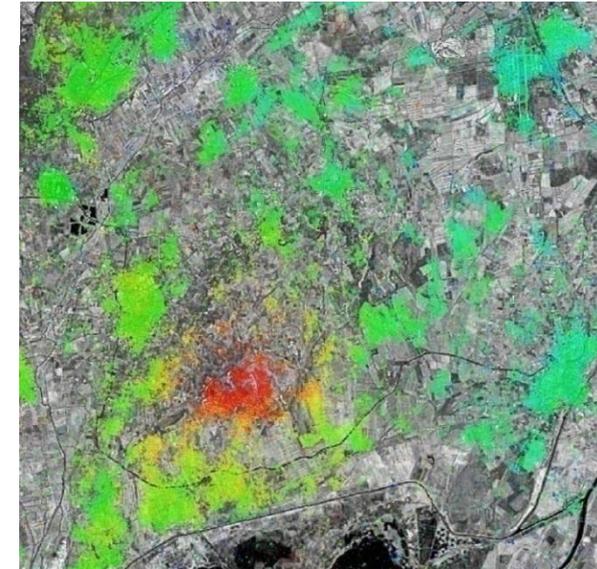
© IGN



InSAR

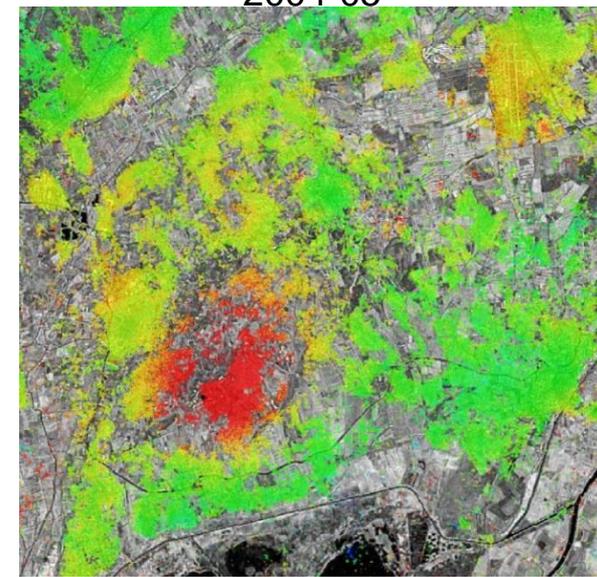
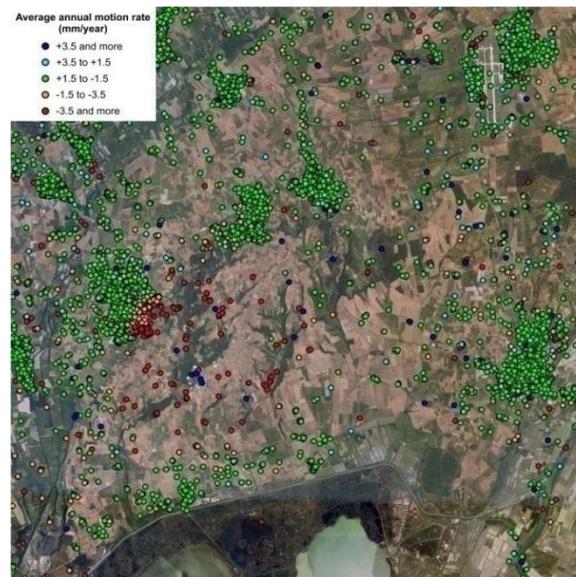
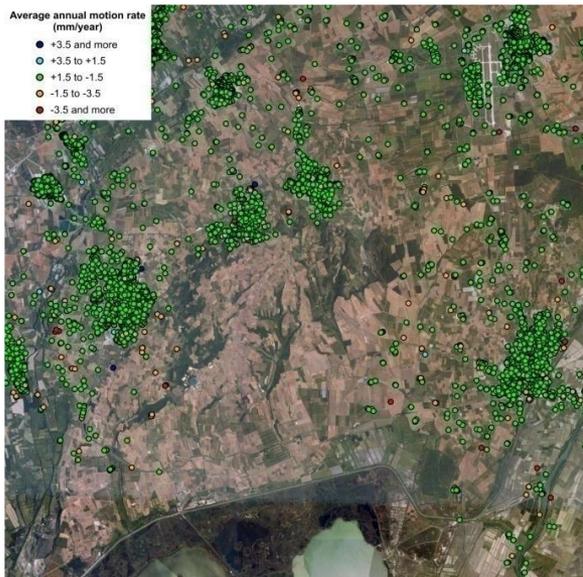
- Etude BRGM 2003 (ERS 1993-1999)
- Etudes Fugro DifsAR et PSI 2010 (77 ERS 1992-2000, 23 Envisat 2002-2007) et 2015 (25 ERS 2003-2010)
- Cohérence DifsAR Envisat meilleure que ERS
- Meilleure répartition du nombre de PS Envisat
- Variation de la zone affectée de déformations
- Subsidence maximale selon périodes et méthodes BRGM 2.2 cm/an, Fugro 2.5 à 3 cm/an

© Fugro



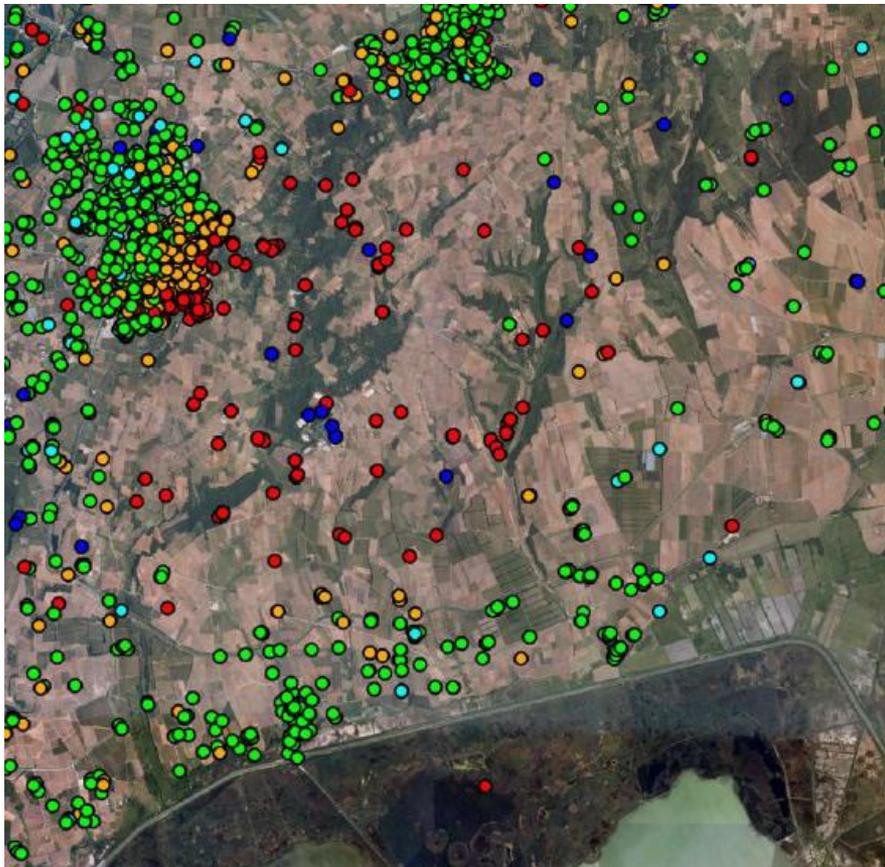
2004-05

© Fugro



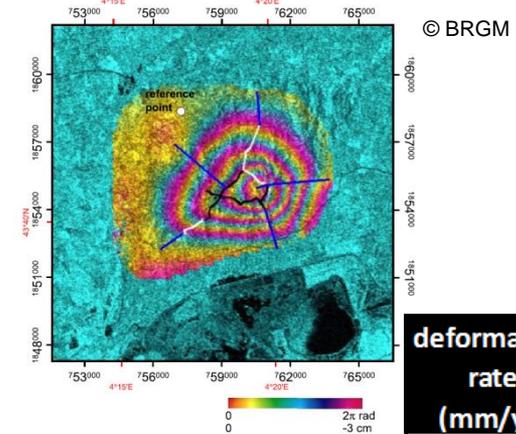
Résultats InSAR

- Variabilité de l'étendue du bol et la magnitude de la déformation
- Variabilité importante dans le temps des séries temporelles (valeurs réalistes à partir d'un intervalle de 2 ans minimum)
- PS aberrants



Average annual motion rate (mm/year)

- +3.5 and more
- +3.5 to +1.5
- +1.5 to -1.5
- -1.5 to -3.5
- -3.5 and more



© BRGM

Satellite	Master	Slave	Temporal separation (days)	Extent (Km ²)	maximum deformation (mm)	deformation rate (mm/yr)
ERS	20/04/1992	05/04/1993	350	15.3	-37.1	-39
ERS	10/05/1993	03/05/1995	723	26.3	-62.1	-31
ERS	06/12/1993	26/10/1995	689	36.1	-62.1	-33
ERS	07/06/1995	12/06/1997	736	10.9	-51.8	-26
ERS	03/01/1996	04/12/1997	701	18.8	-51.1	-27
ERS	22/05/1996	19/03/1998	666	14.5	-53.1	-29
ERS	25/09/1997	15/10/1998	385	13	-39	-37
ERS	30/10/1997	13/01/2000	805	12.9	-44.1	-20
ERS	04/12/1997	19/11/1998	350	11.4	-41.1	-43
ERS	19/03/1998	28/01/1999	315	13.6	-38.4	-45
ERS	19/11/1998	19/10/2000	700	19.1	-50	-26
ERS	16/02/2000	28/12/2000	316	12.3	-38.5	-45
Envisat	17/12/2002	10/02/2004	420	10	-41.2	-36
Envisat	10/02/2004	25/01/2005	350	22.7	-48.9	-51
Envisat	25/01/2005	27/09/2005	245	9.8	-40	-60
Envisat	27/09/2005	14/02/2006	140	n/a	-21	-55
Envisat	14/02/2006	30/01/2007	350	16.7	-46	-48
Envisat	30/01/2007	10/04/2007	70	n/a	-29.7	-155

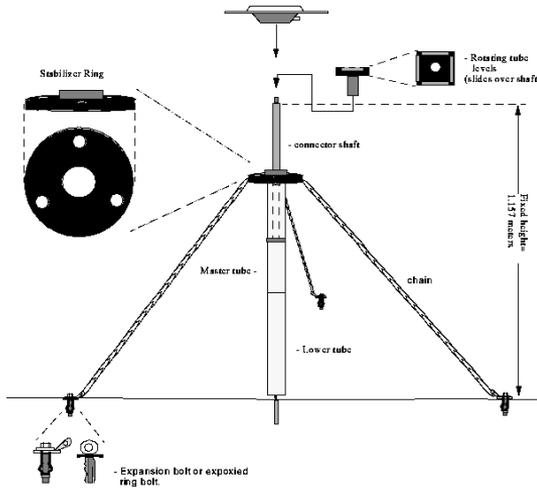
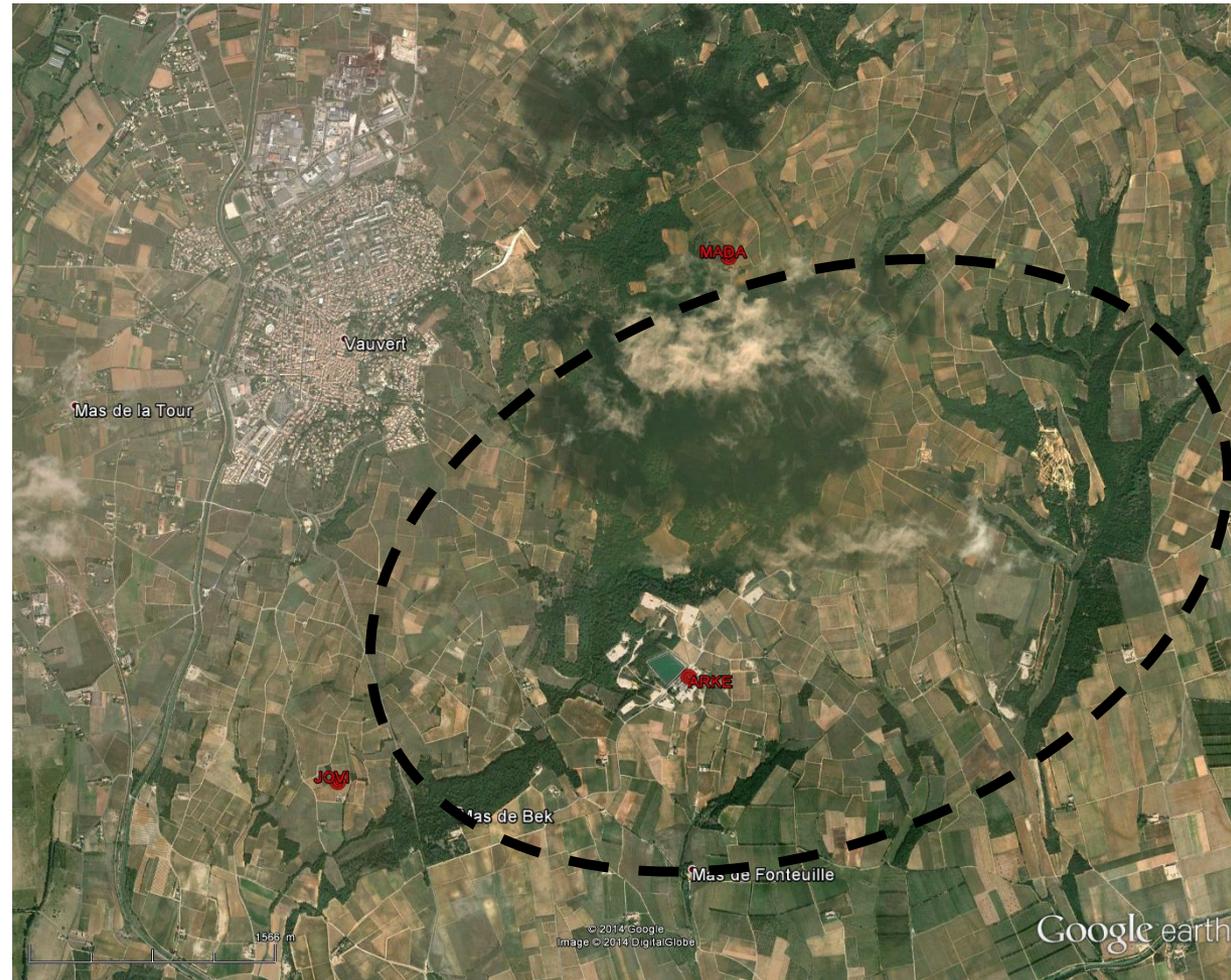
deformation rate (mm/yr)
-39
-31
-33
-26
-27
-29
-37
-20
-43
-45
-26
-45
-26
-36
-51
-60
-55
-48
-155

© Fugro

Saline souterraine de Vauvert, Languedoc

GPS

- Trois points, campagnes épisodiques annuelles en fin d'été (8 à 10 j)
- Matérialisation légère (dalles et mâts UNAVCO)



Saline souterraine de Vauvert, Languedoc

Résultats GPS

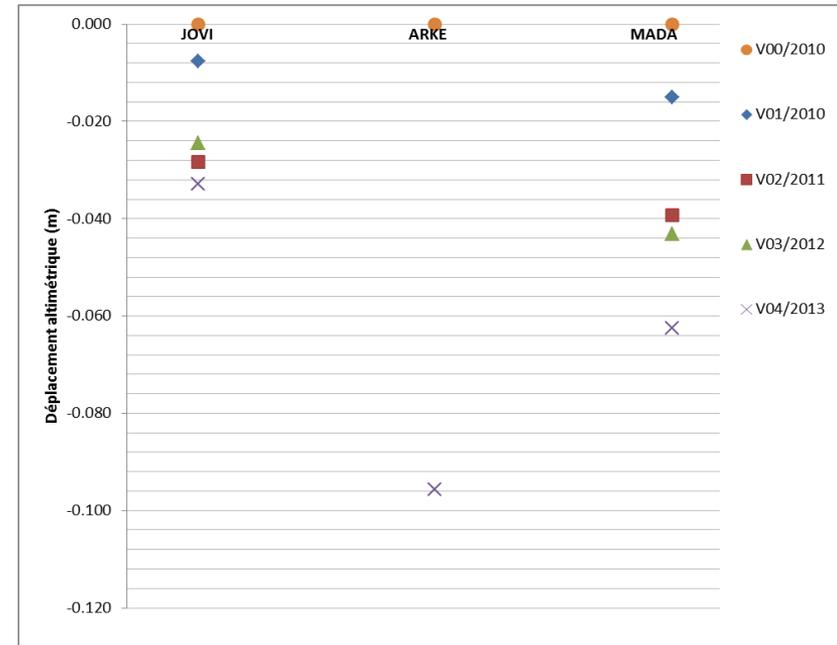
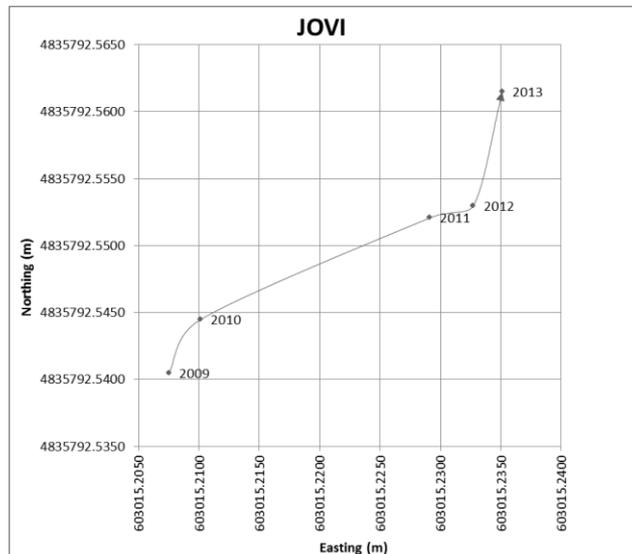
- Zone centrale inappropriée (rig de forage, véhicules, clôtures...)
- Déplacements horizontaux et verticaux en dehors du bol présumé (tel que circonscrit par InSAR), en particulier au SW (JOVI)
- Perspective: mise en place d'une station permanente, campagnes épisodiques biannuelles



© Fugro

V04(2013.84) - V00 (2009.58)

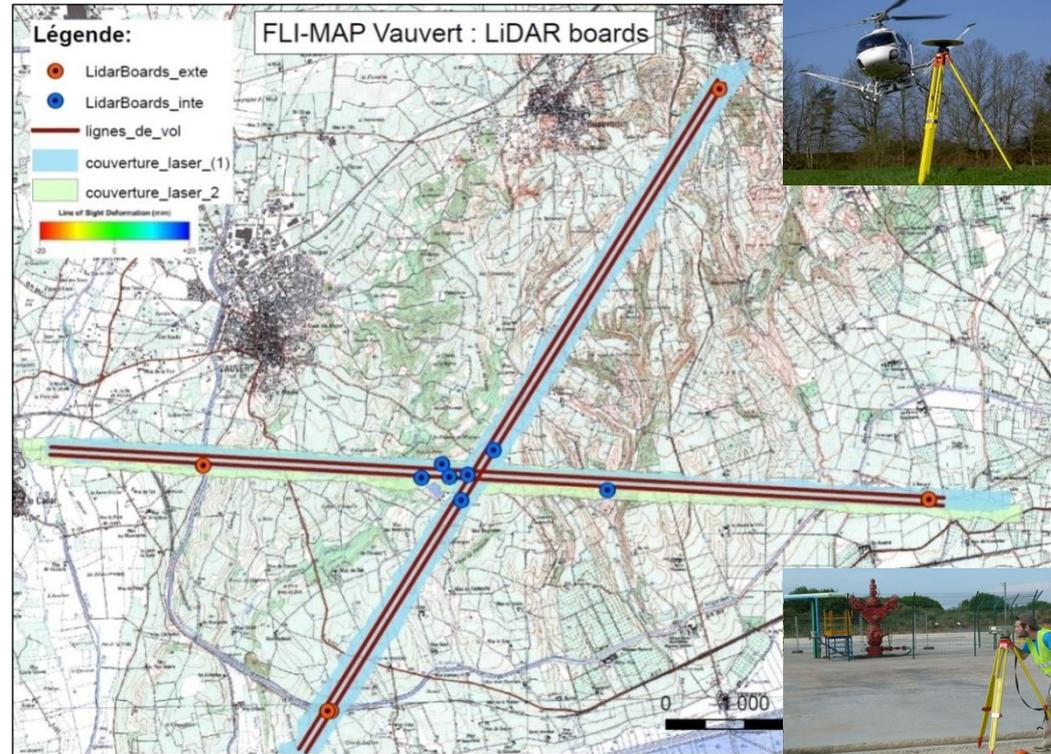
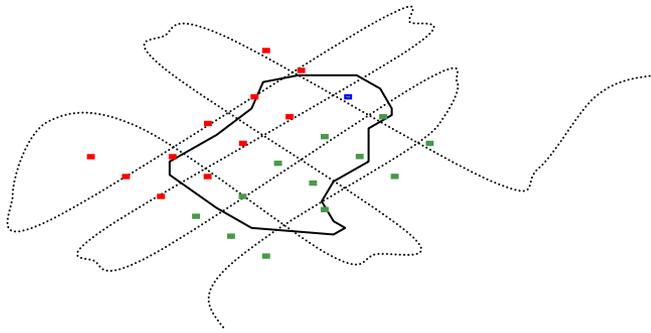
Station	ΔHauteur (m)
JOVI	-0.033
ARKE	-0.096
MADA	-0.063



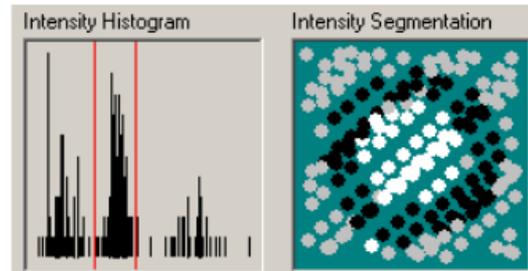
Saline souterraine de Vauvert, Languedoc

LiDAR

- 3 campagnes, plan de vol en croix
- 6+7 Points de Calage (LiDAR Boards) à l'extérieur et à l'intérieur du bol
- 4 Points de Contrôle
- Précision sub centimétrique avec Points de Calage (LiDAR Boards) et redondance des vols
- Coût élevé sauf si opération conjuguée à un autre vol LiDAR



nombres de survol	nombre de points de contrôle	Précision Δhauteur (cm)
1 (au moins)	27	2.7
2 (au moins)	22	1.5
3	3	0.6

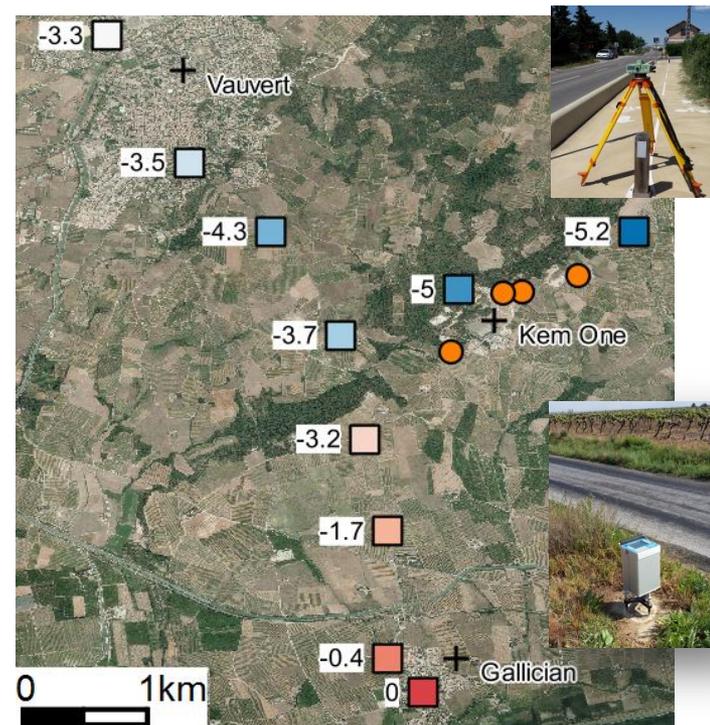
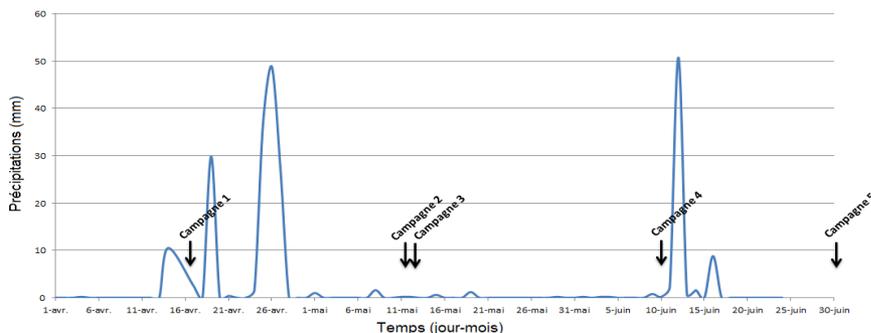


© Fugro

Saline souterraine de Vauvert, Languedoc

Micro-gravimétrie

- Mesures des transferts de masses (variation de l'aquifère/infiltration d'eau, eau injectée, saumure extraite)
- Précision (sessions de 30 min, boucles avec réoccupation partielle) 3 μGal
- Apport en eau dans le sol : 6.2 μGal



- Puits en exploitation
- Anomalie de Bouguer relative (mGal)

Campagnes	Nombre de boucles	Moyennes des doubles différences entre campagnes relatives au point 2 (μGal)
1-2	3	-7,4
	1	-4,2
1-3	3	-5,8
	1	-3,5
1-4	3	-6,2
	1	-6,1
1-5	3	-0,9
	1	1,7
1-6	3	-1,0
	1	2,8



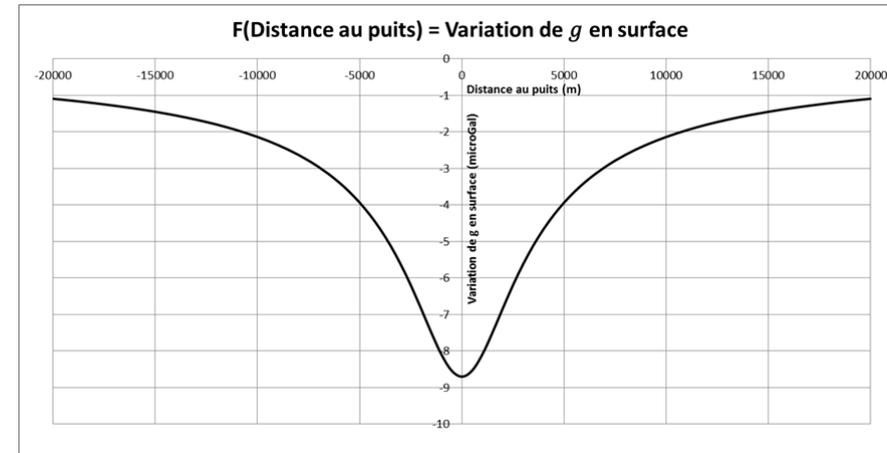
Saline souterraine de Vauvert, Languedoc

Résultats

- Modélisation de l'influence de l'injection d'eau et extraction de saumure sur la gravité en surface
- Variations de g en surface dues à la subsidence et à l'extraction de saumure mesurables avec une périodicité biannuelle

Perspectives

- Augmenter le nombre de cycles de mesure à chaque campagne
- Gravimétrie absolue sur deux points de référence

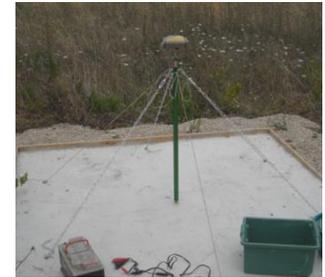
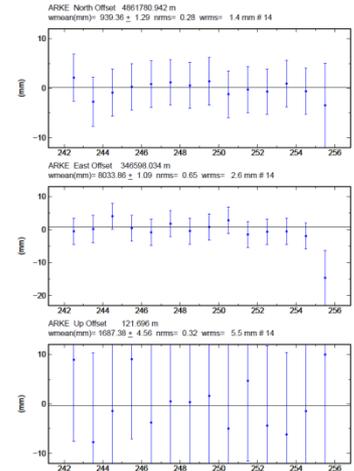


Phénomènes	Valeurs
Déformation de surface	Jusqu'à 2,5 cm/an
Variation de g	Jusqu'à +7,7 μ Gal/an
Influence des 4 puits actifs sur le point 6 en surface	500 000 tonnes de sel de dissolution/an
Variation de g au point 6	-2,0 μ Gal/an
Total	Jusqu'à 5,7 μ Gal/an
Pourcentage de la variation de masse par rapport à la déformation de surface	35 %

Saline souterraine de Vauvert, Languedoc

Synthèse

- Contexte favorable à toutes les techniques
- Variabilité spatiotemporelle de la déformation mais relativement lente (durée de vie des puits 10+ ans)
- Vitesses concordantes (maximales 2.2 à 3 cm/an)
- Comparaisons rigoureuses difficiles (variations spatiales et temporelles)
- Cohérence acceptable en première approximation (MADA) mais pas en tout point (JOVIS)
- Les différentes techniques sont affectées de biais différents et indépendants, elles se complètent donc bien
- Rapport coût/bénéfice en faveur de la combinaison InSAR - GPS - micro-gravimétrie, par rapport au nivellement et surtout du LiDAR
- Déplacement horizontal mesuré uniquement avec GPS



Perspectives

- Station permanente GPS
- Campagne GPS épisodiques biannuelles
- Gravimétrie absolue pour valider les points de référence
- Nivellement et gravimétrie relative sur les PS et les puits
- Utilisation d'images SAR COSMO-Skymed et Sentinel
- Traitements InSAR différents (SBAS, réduction du bruit atmosphérique avec modèles et données complémentaires)



© Fugro

Champ gazier
en mer
Golfe Arabo-
persique
(GPS)



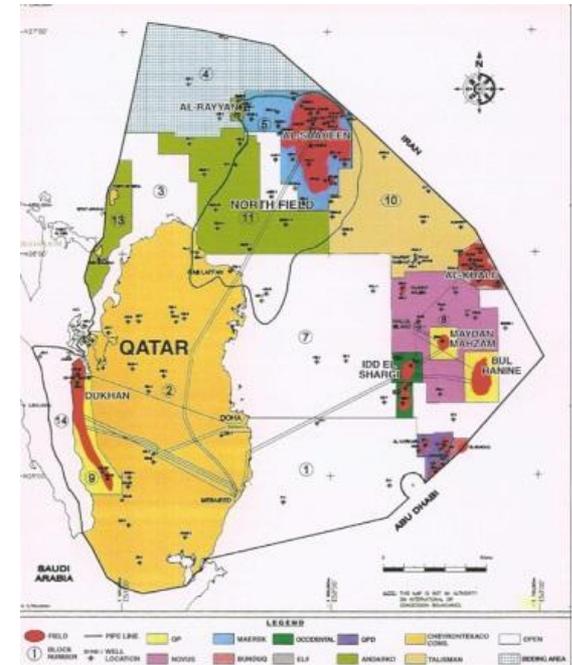
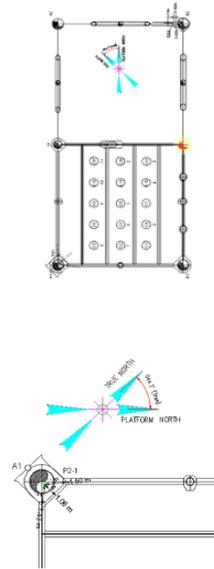
Champ gazier dans le golfe Arabo-persique

Contexte

- D'après le modèle géomécanique, à cause de l'extraction de gaz naturel les plateformes offshore de ce champ gazier du golfe Arabo-persique sont susceptibles d'être affectées de subsidence
- **Programme motivé pour valider le modèle géomécanique et le comportement des structures**

Travaux

- **Déterminer les positions et hauteurs des stations** à 4 ans d'intervalle dans le référentiel géodésique en vigueur (réalisation antérieure de l'ITRS) à partir de campagnes épisodiques avec sessions courtes (5 à 7j)
- Géoréférencement exigé avec le logiciel BERNESE (AIUB)

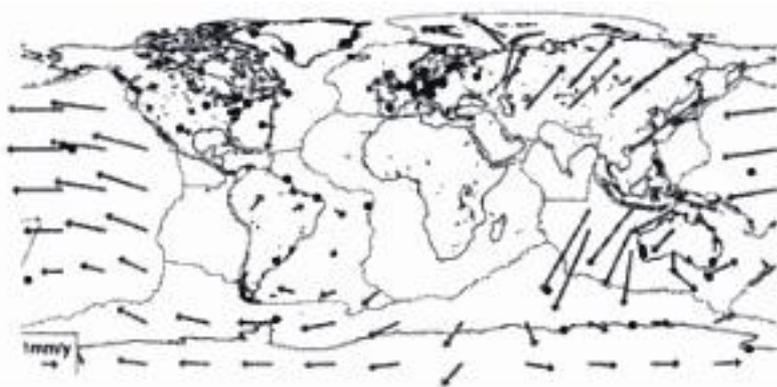


Champ gazier dans le golfe Arabo_persique

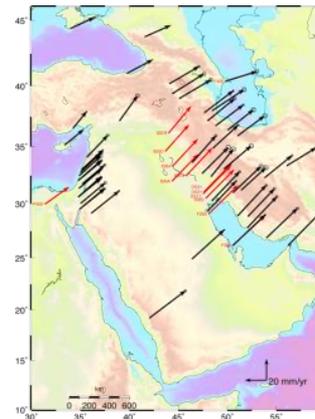
Problématiques spécifiques

- **Canevas géodésique de référence insuffisamment précis** (relatif, stabilité, géométrie)
- **Distances des stations de référence** (décorrélation spatiale due entre autres aux variations troposphériques depuis les stations de référence forcément distantes)
- **Budget limité** : mesures épisodiques (non continues) et durée des sessions limitées par les opérations de levé sur les plateformes
- **Géoréférencement dans une réalisation et époque de référence antérieures**
- **A l'origine, utilisation par le client d'un champ de vitesse imprécis pour la plaque arabique** (NNR NUVEL 1A) inutilisable pour effectuer la mise en référence dans une ancienne réalisation et à une époque antérieure de l'ITRS exigée pour la mesure de déformations dans le temps

ITRF2000 and NNR-NUVEL-1A velocity differences

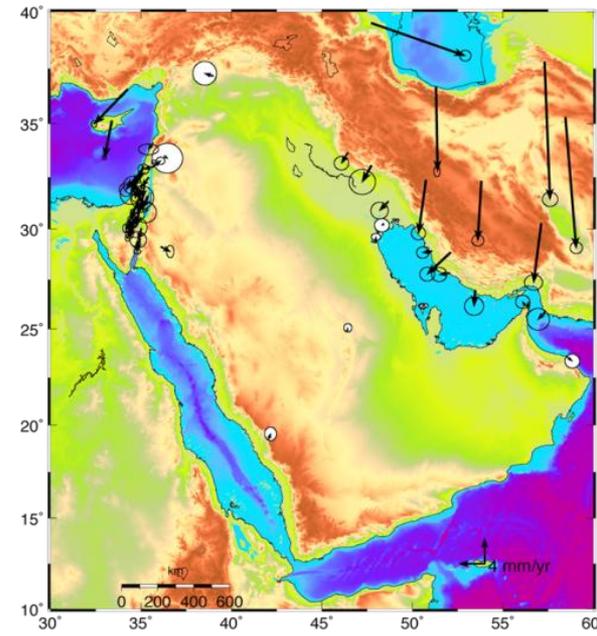


© IERS



Station velocities relative to

- **Arabian plate**
 - **ITRF2000 datum**



© Fugro

Champ gazier dans le golfe Arabo-persique

Résultats

- Détermination des coordonnées des stations précises à **2 mm** en position and **3 mm** en hauteur
- **Mise en évidence de déplacements des CORS (réseau géodésique actif à terre):** subsidence/tassement de **12 mm** détectée sur 2 CORS
- **Légère subsidence** de 9 mm en 4 ans sur les deux plateformes principales
- **Déplacement horizontal** de 22 mm vers le NE
- **Détermination des vitesses théoriques des stations** (hypothèse de plaque rigide) après avoir déterminé la rotation de la plaque Arabique au moyen de stations semi-permanentes régionales (GlobK)
- **Démonstration de la précision insuffisante** de la réalisation du référentiel géodésique national pour les applications de géomonitoring géodésique contrairement aux croyances communes

NUM	NAME	FLG	RESIDUALS IN MILLIMETERS		
1	ALTA	I W	0.4	0.2	-0.2
2	QUNI	I W	0.3	0.1	-0.7
3	ABUD	I W	-0.3	-0.2	1.7
5	KUWA	I W	0.2	0.0	2.2
6	SALH	I W	0.0	0.2	0.6
17	G410	I W	-0.1	-0.2	-1.0
18	G770	I W	-0.3	-0.1	-2.6
RMS / COMPONENT			0.3	0.2	1.7

	N (mm)	E (mm)	H (mm)
Station RMS	1.7	1.2	2.9
Fitting RMS	0.3	0.2	1.7
1- σ accuracy	1.7	1.2	3.3

Précision des stations en ITRF2008 à l'époque des mesures

Résidus de l'adaptation de Helmert (BERNESE)

Champ gazier dans le golfe Arabo-persique

Solution

- **Augmentation** du nombre de stations de référence utilisées (très au-delà du seul golfe Arabo-persique)
- **Redétermination** du réseau de référence local à chaque campagne (**CORS imprécises et instables**)
- **Détermination des vitesses des stations à partir des paramètres de rotation de la plaque arabique déterminés via GAMIT-GLOBK à partir des seules stations fiducielles régionales** (IGS et réseau de stations semi-permanentes mises en place pendant une campagne de mesures géodynamiques)

Enseignement

- **Difficulté de mitigation des effets d'un environnement offshore** (réflexions, multi trajets) **avec des sessions courtes**
- **Difficulté de géoréférencement précis** avec campagnes épisodiques (non continues) et sessions courtes
- **La détermination de positions à une époque zéro est conditionnée à la connaissance précise des vitesses des stations** dans le référentiel géodésique utilisé

Perspective et limitation

- **Stations permanentes bi fréquences à bas coût** pour éliminer les biais corrélés temporellement (multi trajets de période longue, variations troposphériques) et ne pas être à la merci d'une période de scintillement ionosphérique
- **Augmentation** du nombre de stations permanentes régionales
- **Combinaison GPS et inclinomètres** (analyse combinée des déplacements horizontaux et verticaux)

**Champ gazier
dans le détroit
de Macassar
(Indonésie)
(GPS)**



Champ gazier dans le détroit de Macassar (Célèbes/Sulawesi)

Contexte

- Plateforme située à 1300 km de la première station permanente.
- Les prestataires locaux ont échoué à fournir des résultats utilisables, mesurant un mouvement vers le haut de la plateforme peu réaliste, empêchant ainsi toute anticipation fiable : calcul initial avec un logiciel standard en ligne (AUSPOS/BPE), puis avec BERNESE/BPE (configuration standard) et un géoréférencement inadapté (réalisation à l'époque zéro imprécise, utilisation de Nuvel NNR)
- Programme motivé pour valider le modèle géomécanique et le comportement de la structure



© Fugro



Travaux

- Post-traiter 3 sessions GPS de 5j à intervalle de 3 mois en utilisant obligatoirement BERNESE (exigence du client)
- Analyser le comportement de la plateforme à partir d'acquisition GPS continue (GAMIT-GLOBK)

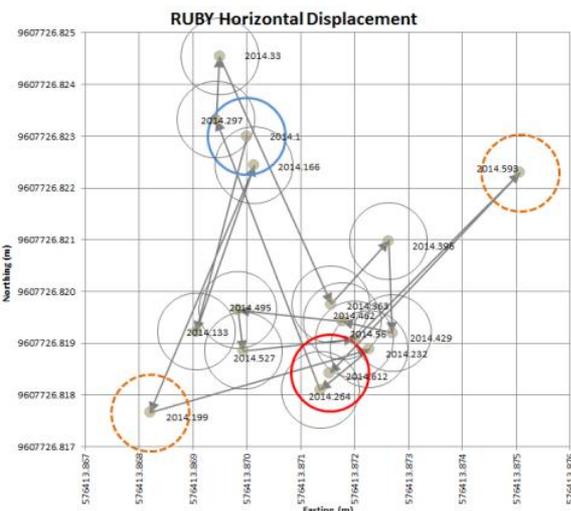
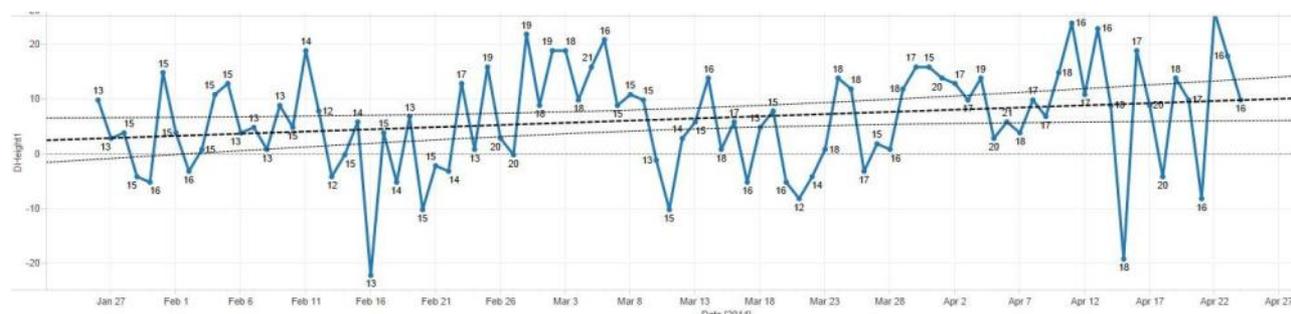


Champ gazier dans le détroit de Macassar (Célèbes/Sulawesi)

Problématiques spécifiques

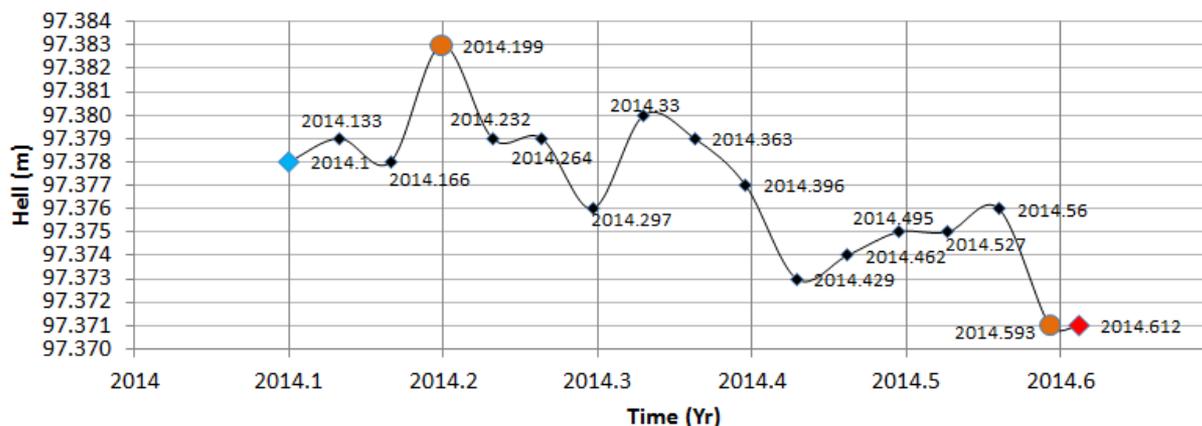
- Pas de canevas géodésique et station de référence proche (station la plus proche à 1300 km)
- Démontrer au gestionnaire que les méthodes proposées n'étaient pas pertinentes (BERNESE Processing Engine utilisé en configuration standard via AUSPOS ou même directement dans BERNESE)

Déplacement vertical apparent avec calcul standard



© Fugro

Déplacement vertical réel de la plateforme



Champ gazier dans le détroit de Macassar (Célèbes/Sulawesi)

Solution

- Utilisation d'un **grand nombre de stations permanentes** des différents réseaux (IGS , Fugro Starfix etc.) pour s'affranchir de systématismes liés à une géométrie déséquilibrée
- **Augmentation des durées** des sessions GPS post-traitées
- Calcul de la position de la station à l'époque zéro à partir des paramètres de rotation de la sous-plaque déterminés via GAMIT-GLOBK à **partir des seules stations fiducielles régionales** (IGS, Fugro Starfix etc.)

Enseignement

- **Echec des solutions clé en main** (AUSPOS/BPE mais même BERNESE/BPE si non adapté à la configuration)
- **Ecarts** entre les mesures **épisodiques et permanentes**: jusqu'à 4 mm en hauteur entre les sessions de 5j et les moyennes sur 14j
- Détermination des **mouvements basse fréquence** de la plateforme à **1 mm en position et hauteur**, permettant de corrélérer le cas échéant certains déplacements avec des évènements particuliers

Perspective et limitation

- Similaires au cas de figure du golfe Arabo-Persique (stations permanentes bi-fréquences à bas coût (éliminer les biais corrélés en temps : variations troposphériques, scintillement ionosphérique), augmentation du nombre et de la répartition des stations permanentes régionales)
- **Combinaison GPS et inclinomètres** (analyse combinée des déplacement horizontaux et verticaux)
- En l'absence de station de référence proche, détermination des **mouvements haute fréquence par PPP** avec logiciel performant (GIPSY OASIS, Fugro PPP-FR/IAR...)

**Champ
pétrolier en
mer de Chine
(Brunei)
(GPS)**



Champ pétrolier en mer de Chine méridionale

Contexte

- Le gestionnaire du champs attendait une **légère subsidence** sur les différentes plateformes du champ
- Les solutions standard ne **décelaient aucun mouvement clair** (Trimble Integrity Monitoring et post-traitement) quelque soit l'intervalle de temps considéré (trimestriel, biannuel, annuel)



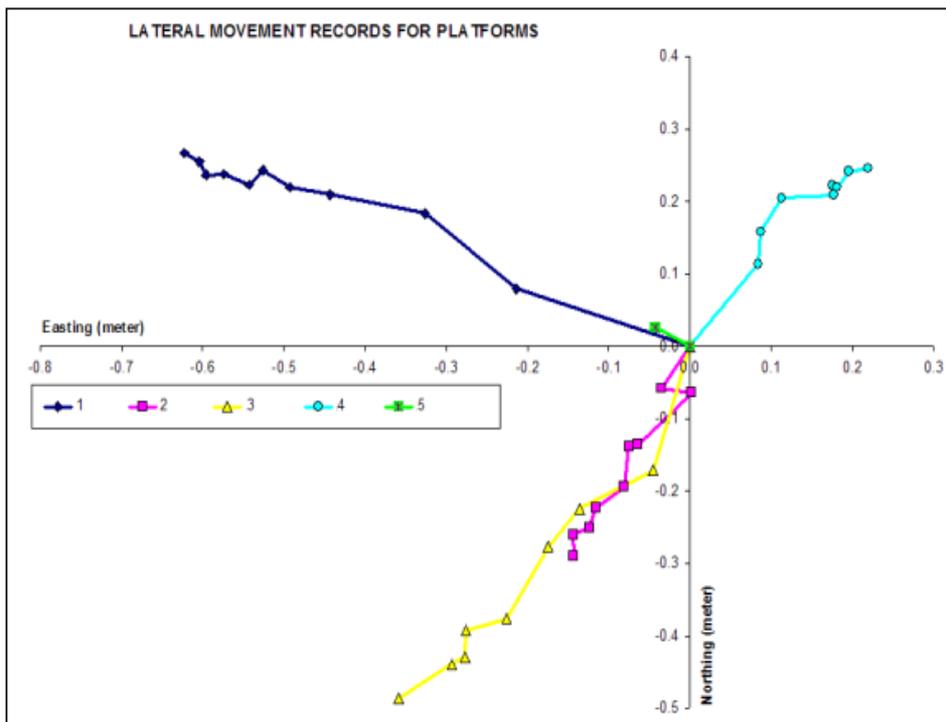
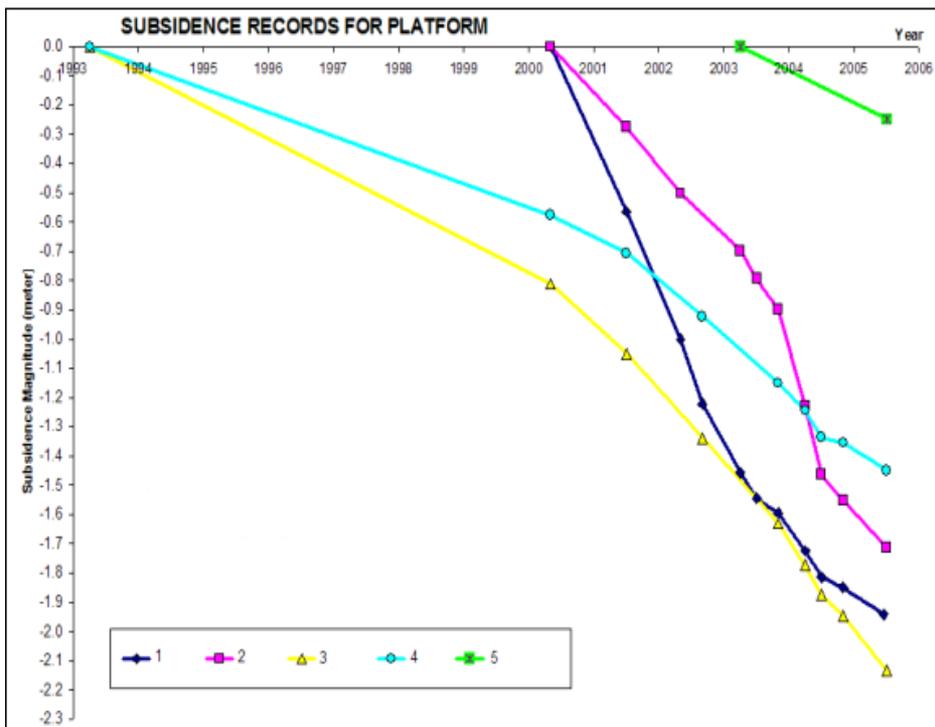
Travaux

- Réalisation d'un référentiel à l'époque zéro (9 stations de monitoring)
- Post-traitement d'observations GPS continu (18+ mois)



Champ pétrolier en mer de Chine méridionale

Plateformes proches en Malaisie orientale



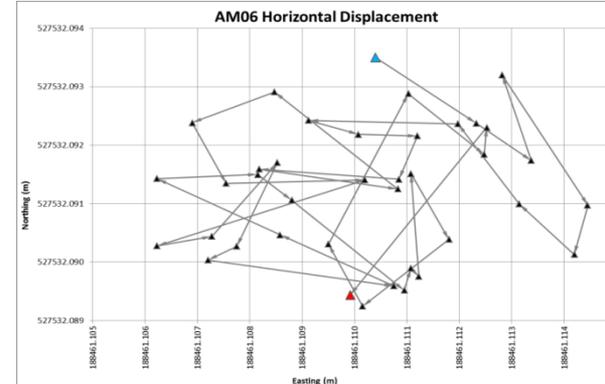
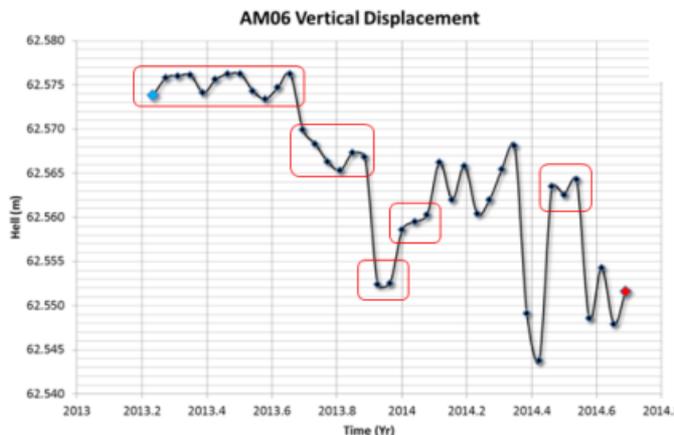
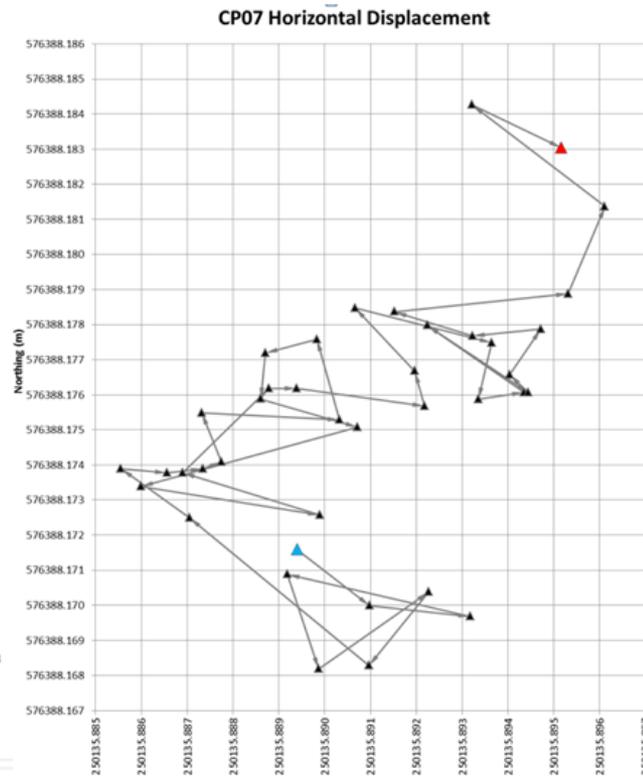
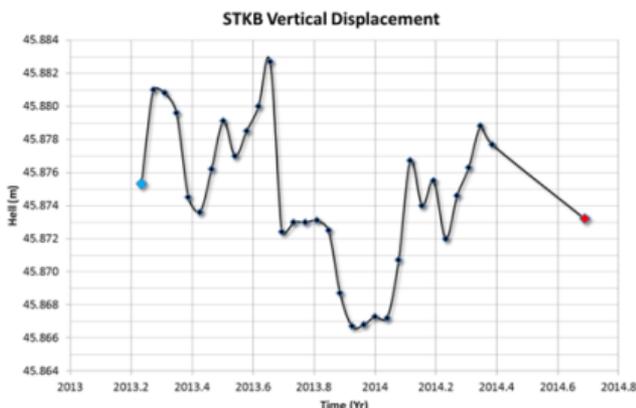
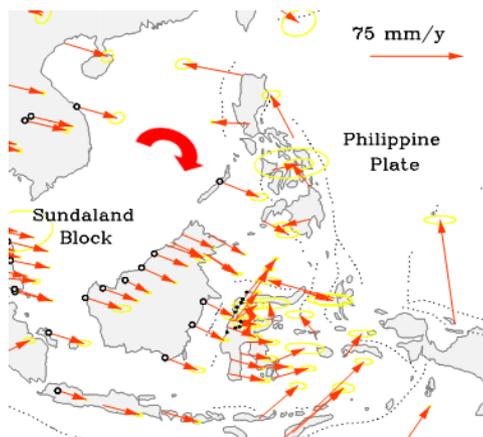
© Fugro

Champ pétrolier en mer de Chine méridionale

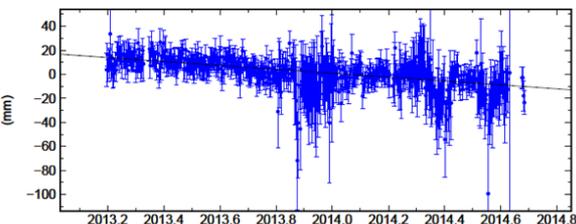
Problématiques spécifiques

- Stations de référence instables (structures)
- Mouvement de la sous-plaque (Sunda) mal connu
- Activités perturbant la réception des signaux GPS (forage, construction...)

© IERS



AM06 Up Offset 62.566 m
rate(mm/yr)= -16.25 ± 1.20 nrms= 0.68 wrms= 7.3 mm # 512



© Fugro

Champ pétrolier en mer de Chine méridionale

Solution

- **Redétermination des stations à terre présumées stables** en même temps que les stations en mer
- **Calcul des vitesses des stations de monitoring à partir des paramètres de rotation de la sous-plaque déterminés à partir** des seules stations fiduciaires régionales (dont Fugro Starfix)

Enseignement

- **Détection de légers mouvements sur les stations à terre**
- Détermination des **mouvements basse fréquence** des stations à terre et en mer à **1 mm en position et hauteur**, permettant de corréliser certains déplacements avec des événements particuliers
- **Avec les paramètres de rotation publiés, obtention de déplacements résiduels apparents** sur toute les stations de monitoring : le monitoring depuis des stations éloignées exige que la rotation de la plaque/sous plaque tectonique soit précisément modélisée

Perspectives et limitations

- Similaires aux cas de figure en mer précédents
- Grâce à la présence de stations de référence proche (stations Fugro Starfix à une distance inférieure à 150 km), **possibilité de détermination des mouvements haute fréquence en PPK (GAMIT-TRACK)**

Conclusion et questions



Accès aux données limité

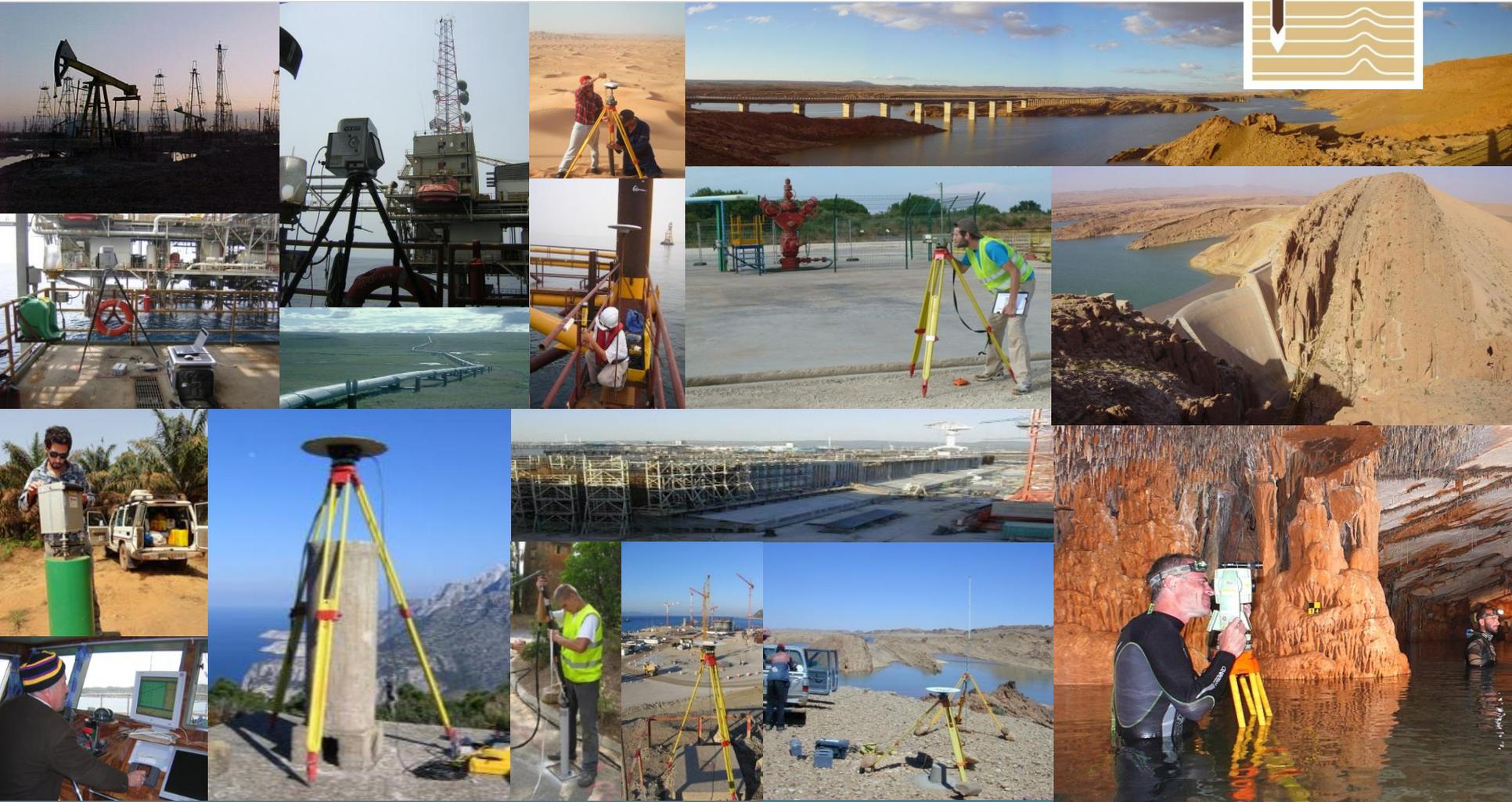
- Prestataires de services différents (GPS, InSAR, nivellement, micro-gravimétrie, inclinométrie...)
- Confiance limitée des gestionnaires de champs dans les différentes techniques (nécessitant une expertise), donc réticence à partager les données de ces différentes techniques (**l'indépendance prévaut sur la précision**)
- Contraintes de temps et budget (**prévaut sur les considérations techniques**)

Contraintes

- Configuration de monitoring historique **non optimale**
- Nécessité de conserver la **continuité des mesures historiques**
- Difficultés spécifiques pouvant accentuer la non-linéarité des déformations (injection d'eau ou de gaz etc.)
- Spécifications de géoréférencement **dans un référentiel géodésique particulier** (réalisation adaptée ou pas, avec un modèle de vitesse parfois imprécis)

Toutes les techniques ont leurs avantages, inconvénients et des biais différents

- **Incertitudes GPS , InSAR ou LiDAR toujours surestimées**, nivellement et micro-gravimétrie également quoique dans une moindre mesure
- Déformation **tridimensionnelle** et non pas selon une direction (ex LoS de l'InSAR, H du nivellement)
- **Résolutions** spatiale et temporelle **différentes**
- Biais corrélés ou indépendants



Merci