



This paper is a part of the hereunder thematic dossier published in OGST Journal, Vol. 67, No. 2, pp. 187-372 and available online [here](#)

Cet article fait partie du dossier thématique ci-dessous publié dans la revue OGST, Vol. 67, n°2, pp. 187-372 et téléchargeable [ici](#)

DOSSIER Edited by/Sous la direction de : F. Roggero

Monitoring of CO₂ Sequestration and Hydrocarbon Production

Monitoring pour le stockage du CO₂ et la production des hydrocarbures

Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles, Vol. 67 (2012), No. 2, pp. 187-372

Copyright © 2012, IFP Energies nouvelles

- 187 > Editorial
- 193 > *Prediction under Uncertainty on a Mature Field*
Prévision de production sous incertitude pour un champ mature
M. Feraille and A. Marrel
- 207 > *Advanced Integrated Workflows for Incorporating Both Production and 4D Seismic-Related Data into Reservoir Models*
Boucle de calage avancée pour construire des modèles de réservoir contraints par les données de production et les attributs sismiques
M. Le Ravalec, É. Tillier, S. Da Veiga, G. Enchery and V. Gervais
- 221 > *Joint Inversion of Fracture Model Properties for CO₂ Storage Monitoring or Oil Recovery History Matching*
Inversion conjointe des propriétés d'un modèle de fractures pour le monitoring d'un stockage de CO₂ ou le calage d'un historique de production
M. Verschuer, A. Fournio and J.-P. Chilès
- 237 > *History Matching of Production and 4D Seismic Data: Application to the Girassol Field, Offshore Angola*
Calage simultané des données de production et de sismique 4D : application au champ de Girassol, Offshore Angola
F. Roggero, O. Lerat, D.Y. Ding, P. Berthet, C. Bordenave, F. Lefevre and P. Perfetti
- 263 > *Monitoring of SAGD Process: Seismic Interpretation of Ray+Born Synthetic 4D Data*
Monitoring de procédé SAGD : interprétation sismique de données 4D synthétiques ray+Born
C. Joseph, G. Étienne, É. Forgues, O. Lerat, A. Baroni, G. Renard and É. Bathellier
- 289 > *Simultaneous Inversion of Production Data and Seismic Attributes: Application to a Synthetic SAGD Produced Field Case*
Inversion simultanée des données de production et des attributs sismiques : application à un champ synthétique produit par injection de vapeur
É. Tillier, M. Le Ravalec and S. Da Veiga
- 303 > *Experimental Verification of the Petroelastic Model in the Laboratory – Fluid Substitution and Pressure Effects*
Vérification expérimentale du modèle pétroélastique au laboratoire – Substitutions de fluides et effets de pression
P.N.J. Rasolofoaon and B. Zinszner
- 319 > *Impact of Fractures on CO₂ Storage Monitoring: Keys for an Integrated Approach*
Impact de la présence de fractures pour le monitoring des stockages de CO₂ : éléments pour une approche intégrée
N. Dubos-Sallée, P.N.J. Rasolofoaon, M. Becquey, C. Putot and B. Zinszner
- 329 > *4D Joint Stratigraphic Inversion of Prestack Seismic Data: Application to the CO₂ Storage Reservoir (Utsira Sand Formation) at Sleipner Site*
Inversion stratigraphique jointe 4D de données sismiques avant sommation : application au réservoir de stockage de CO₂ (Formation Utsira) du site de Sleipner
K. Labat, N. Delépine, V. Clochard and P. Ricarte
- 341 > *A Geochemical Approach for Monitoring a CO₂ Pilot Site: Rousse, France. A Major Gases, CO₂-Carbon Isotopes and Noble Gases Combined Approach*
Une méthode géochimique pour la surveillance d'un site pilote de stockage de CO₂ : Rousse, France. Approche combinant les gaz majeurs, l'isotopie du carbone du CO₂ et les gaz rares
B. Garcia, J.H. Billiot, V. Rouchon, G. Mouronval, M. Lescanne, V. Lachet and N. Aimard
- 355 > *Surface and Subsurface Geochemical Monitoring of an EOR-CO₂ Field: Buracica, Brazil*
Monitoring géochimique en surface et sub-surface d'un gisement en production par récupération assistée et injection de CO₂ : le champ de Buracica, Brésil
C. Magnier, V. Rouchon, C. Bandeira, R. Gonçalves, D. Miller and R. Dino

Éditorial

MONITORING POUR LE STOCKAGE DU CO₂ ET LA PRODUCTION DES HYDROCARBURES

Ce numéro spécial d'*Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles* présente onze articles très variés dans leur contenu, en traitant de l'utilisation des données de production dans les processus de calage d'historique ou du monitoring géochimique dans le cas du stockage de CO₂, mais faisant appel, pour sept d'entre eux, à l'utilisation des techniques de monitoring sismique 3D et 4D, preuve des apports fondamentaux de cette technologie riche encore de potentialités.

“*Prévision de production sous incertitude pour un champ mature*” (M. Feraille et A. Marrel) propose une stratégie cohérente pour entreprendre un calage ou pour définir un plan de monitoring, grâce à l'introduction en amont des incertitudes et des analyses de sensibilité pour identifier les paramètres pertinents. L'article “*Boucle de calage avancée pour construire des modèles de réservoir contraints par les données de production et les attributs sismiques*” (M. Le Ravalec *et al.*) propose une méthodologie prometteuse de calage d'historique, qui peut être étendue aux réservoirs fracturés : “*Inversion conjointe des propriétés d'un modèle de fractures pour le monitoring d'un stockage de CO₂ ou le calage d'un historique de production*” (M. Verscheure *et al.*). Vient ensuite une application sur le cas réel de Girassol “*Calage simultané des données de production et de sismique 4D : application au champ de Girassol, Offshore Angola*” (F. Roggero *et al.*). Les deux articles suivants portent sur le monitoring de la production des huiles lourdes par procédé *Steam-Assisted Gravity Drainage* (SAGD) et sont inspirés du cas *Hangingstone* (Canada) : le papier “*Monitoring de procédé SAGD : interprétation sismique de données 4D synthétiques ray+Born*” (C. Joseph *et al.*), réalisé avec CGG-Veritas, se focalise sur l'interprétation des données de sismique, tandis que le papier “*Inversion simultanée des données de production et des attributs sismiques : application à un champ synthétique produit par injection de vapeur*” (E. Tillier *et al.*) peut être vu comme une présentation des perspectives d'utilisation des données de sismique dans un processus de calage d'historique. Les deux articles suivants portent sur les aspects de modélisation pétro-élastique : “*Vérification expérimentale du modèle pétroélastique au laboratoire – Substitutions de fluides et effets de pression*” (P. Rasolofosaon et B. Zinszner) et “*Impact de la présence de fractures pour le monitoring des stockages de CO₂ : éléments pour une approche intégrée*” (N. Dubos-Sallée *et al.*). Enfin, les trois derniers portent spécifiquement sur le monitoring du stockage de CO₂ et sont basés sur l'interprétation des mesures répétées de sismique ou de géochimie, en surface et sub-surface : “*Inversion stratigraphique jointe 4D de données sismiques avant sommation : application au réservoir de stockage de CO₂ (Formation Utsira) du site de Sleipner*” (K. Labat *et al.*), puis “*Une méthode géochimique pour la surveillance d'un site pilote de stockage de CO₂ : Rousse, France. Approche combinant les gaz majeurs, l'isotopie du carbone du CO₂ et les gaz rares*” (B. Garcia *et al.*) et enfin “*Monitoring géochimique en surface et sub-surface d'un gisement en production par récupération assistée et injection de CO₂ : le champ de Buracica, Brésil*” (C. Magnier *et al.*).

Dans le domaine des hydrocarbures, le monitoring sismique peut améliorer la compréhension des mécanismes de production et contribuer à l'optimisation de la production, mais se heurte, jusqu'à présent, à des difficultés d'interprétation. Les récents développements des techniques de modélisation et d'inversion ont montré que l'intégration des données sismiques dans l'actualisation d'un modèle hydraulique de réservoir était pertinente, sous la réserve d'efforts intensifs de

la part d'équipes fortement structurées, mais surtout intégrées en termes de méthodologies d'interprétation sismique séquentielle, de procédés et d'algorithmes d'optimisation numérique, ainsi que de réconciliation des données de réservoir, tant statiques que dynamiques. Ainsi, on peut maintenant considérer que la thématique particulièrement complexe du calage d'historique (*history matching*) s'enrichit de l'utilisation quantitative des données et résultats de la sismique 4D, la méthodologie conduisant à des chaînes de simulations contraintes s'étant progressivement affinée sur des cas synthétiques, puis sur des cas réels de gisements pétroliers, comme par exemple Girassol ou Hangingstone.

La mise en œuvre de sismiques 4D, tant pour le suivi de l'évolution des saturations au sein d'un site de stockage de CO₂ que pour l'optimisation opérationnelle de la production d'hydrocarbures, est coûteuse, mais sans égale en termes de précision et de fiabilité du monitoring associé, dès lors que l'environnement géologique est favorable à une résolution suffisante. Le caractère continu, répétable et intégrateur des données sismiques, mais aussi leurs coûts de traitement et d'acquisition qui se comptent en millions d'euros ont fait redoubler les efforts de recherche pour en tirer le meilleur parti, notamment là où la précision et la continuité des données font défaut et entachent la confiance que l'on peut accorder à la description du réservoir et aux modélisations prédictives de comportement de ce dernier. On peut citer ainsi :

- l'amélioration du rapport signal/bruit dans les zones non affectées par un changement de la saturation ;
- la meilleure réconciliation des données pétrophysiques et sédimentologiques avec les données sismiques et géomécaniques *via* la prise en compte de résultats d'inversion de sismique 4D – impédance acoustique et vitesse – dans la description géométrique des variations latérales de faciès ;
- les nouvelles possibilités d'accès, *via* le traitement de l'anisotropie azimutale des ondes P, à l'impédance acoustique, au module d'Young ou au coefficient de Poisson des roches réservoirs et des couvertures ;
- la meilleure caractérisation de la distribution des hétérogénéités dans le réservoir, et la possibilité de générer des modèles contraints par les données de monitoring ;
- de meilleures prédictions avec un nombre réduit de simulations, grâce aux méthodes statistiques, notamment Bayésiennes ;
- l'optimisation et utilisation exhaustive des données collectées.

Ainsi, la lecture de ces onze articles fait apparaître clairement la pertinence des approches multidisciplinaires, tant pour la réduction des incertitudes des simulations numériques que pour l'inversion des données sismiques ou l'interprétation des données de géochimie pour le monitoring du CO₂. Tout comme le monitoring sismique 3D et 4D l'a déjà fait, le développement de nouvelles technologies à fort caractère intégrateur comme la mesure de la subsidence par interférométrie radar est susceptible de faire encore évoluer la conception des modèles de prédiction en faisant appel à encore plus de géomécanique dans des modèles à l'origine conçus par des mécaniciens des fluides.

Au-delà de cet indéniable intérêt technique dans lequel exploration-production pétrolière et stockage de CO₂ se rejoignent, on notera que l'exigence de fiabilité des méthodes prédictives n'a pas seulement pour cause le besoin de prévoir du mieux possible des investissements et des coûts opératoires liés directement à une production, mais elle répond également à une tendance lourde de notre société qui est de plus en plus concernée par la notion de risque industriel. Ainsi, la réglementation en cours de définition relative au stockage de CO₂ montre un alourdissement procédural : tant pendant la phase d'injection qu'avant rétrocession à l'État de la concession de stockage, un tiers-expert peut être mandaté par l'Administration en charge du sous-sol, afin de vérifier, d'une part la qualité de la modélisation géologique (prise en compte exhaustive des données "statiques") et de sa mise à jour, d'autre part la robustesse des simulations numériques prédictives et de leur calibration sur le court terme (phase d'injection) et le long terme (validation des phénoménologies supposées).

De même, il apparaît clairement que le projet d'EOR-CO₂ *Weyburn*, démarré en septembre 2000 dans un gisement présentant un grand nombre de puits dont les cimentations de qualité standard

pouvaient potentiellement affecter l'étanchéité de la couverture, et son concept associé de monitoring - le "Weyburn CO₂ system" intégrant le contrôle environnemental des eaux souterraines jusqu'en surface, ainsi que de l'atmosphère - ont pesé de tout leur poids de référence internationale pour l'établissement, maintenant systématisé, des lignes de base de monitoring géochimique du CO₂.

Ainsi, les domaines industriels relatifs au sous-sol doivent intégrer très en amont dans leurs métiers les principes de calibration multidisciplinaire afin d'accroître la fiabilité des outils prédictifs.

À l'inconnue géologique, seule une maîtrise accrue des incertitudes est à même de répondre par la mise en œuvre de techniques de monitoring adéquates et leur intégration dans les chaînes de simulation.

Gilles Kimmerlin
Membre du Comité Éditorial de l'OGST

Gilles Munier
Directeur Général de Geogreen

Editorial

MONITORING OF CO₂ STORAGE AND HYDROCARBON PRODUCTION

This special number of *Oil and Gas Science and Technology – Revue d' IFP Energies nouvelles* presents eleven articles highly varied in their contents, by dealing with the use of production data in the processes of history matching or geochemical monitoring in the case of the CO₂ storage, but appealing, for seven of them, to the use of the techniques of 3D and 4D seismic monitoring, proof of the fundamental contributions of this rich technology still of potentialities.

“*Prediction Under Uncertainty on a Mature Field*” (M. Feraille and A. Marrel) proposes a coherent strategy to undertake an history matching or to define a plan of monitoring, thanks to the introduction upstream to the uncertainties and the analyses of sensibility to identify the relevant parameters. The article “*Advanced Integrated Workflows for Incorporating Both Production and 4D Seismic-Related Data into Reservoir Models*” (M. Le Ravalec *et al.*) proposes a promising methodology of history matching, which can be widened to the fractured reservoirs: “*Joint Inversion of Fracture Model Properties for CO₂ Storage Monitoring or Oil Recovery History Matching*” (M. Verscheure *et al.*). An application on the real case of Girassol comes then “*History Matching of Production and 4D Seismic Data: Application to the Girassol Field, Offshore Angola*” (F. Roggero *et al.*). Following 2 articles concern the monitoring of the production of heavy oil by process ‘Steam-Assisted Gravity Drainage’ (SAGD) and are inspired by the case Hangingstone (Canada): the paper “*Monitoring of SAGD Process: Seismic Interpretation of Ray+Born Synthetic 4D Data*” (C. Joseph *et al.*), realized with CGG-Veritas, focuses on the interpretation of the data of seismic survey, whereas the paper “*Simultaneous Inversion of Production Data and Seismic Attributes: Application to a Synthetic SAGD Produced Field Case*” (E. Tillier *et al.*) can be seen as a presentation of the perspectives of use of the seismic survey data in a history matching process. Following two articles concern the aspects of petroelastic modelling: “*Experimental Verification of the Petroelastic Model in the Laboratory – Fluid Substitution and Pressure Effects*” (P. Rasolofosaon and B. Zinszner) and “*Impact of Fractures on CO₂ Storage Monitoring – Keys for an Integrated Approach*” (N. Dubos-Sallée *et al.*). Finally, three last ones concern specifically the monitoring of the CO₂ storage and the treatment of the basic lines of on-surface CO₂ and subsurface: “*4D joint stratigraphic inversion of prestack seismic data: Application to the CO₂ storage reservoir (Utsira sand formation) at Sleipner site*” (K. Labat *et al.*), then “*A geochemical approach for monitoring a CO₂ pilot site: Rousse, France. A major gases, CO₂-carbon isotopes and noble gases combined approach*” (B. Garcia *et al.*) and finally “*Surface and subsurface geochemical monitoring of an EOR-CO₂ field: Buracica Brazil*” (C. Magnier *et al.*).

In the field of hydrocarbons, the seismic monitoring can improve the understanding of the mechanisms of production and contribute to the optimization of the production, but collided until now with difficulties of interpretation. The recent developments of the techniques of modelling and inversion showed that the integration of the seismic data in the updating of a hydraulic model of reservoir was relevant, under the reserve of extensive efforts on behalf of strongly structured teams, but especially integrated into terms of methodologies of sequential seismic interpretation, processes and algorithms of digital optimization, as well as reconciliation of the data of reservoir, so static as dynamic. So, we can now consider that the particularly complex theme of history matching grows rich of the quantitative use of the data and the results of the 4D seismic survey, the methodology leading to forced simulation chains having gradually become refined on synthetic cases, then on real cases of oil-fields as for example Girassol or Hangingstone.

The implementation of seismic surveys 4D, so much for the follow-up of the evolution of the saturations within a site of storage of CO₂, that for the operational optimization of a SAGD, is expensive, but without equal in terms of precision and reliability of the associated monitoring, since the geologic environment is favorable to a sufficient resolution. The continuous, repeatable and integrator character of the seismic data, but also their costs of treatment and acquisition which count in million Euro double the efforts of research to pull the best party, in particular there where

the precision and the continuity of the data are lacking and soil the confidence which we can grant to the description of the reservoir and to the predictive modellings of behavior of this last one. We can quote so:

- the improvement of the signal-to-noise ratio in zones not affected by a change of the saturation;
- The best reconciliation of the petrophysical data and sedimentological ones with the seismic and geomechanical data *via* the consideration of results of seismic survey 4D inversion – acoustic impedance and speed – in the geometrical description of the side variations of facies;
- the new possibilities of access, *via* the treatment of the azimuthal anisotropy of the waves P, to the acoustic impedance, to the Young modulus or to the Poisson coefficient of rocks reservoirs and caprocks;
- the best characterization of the heterogeneousness distribution in the reservoir and the possibility of generating models forced by monitoring data;
- of better predictions with a reduced number of simulations, thanks to the statistical methods, in particular Bayesian ones;
- the optimization and the exhaustive use of the collected data.

So, the reading of these eleven articles creates clearly the relevance of the multidisciplinary approaches, so much for the reduction of the uncertainties of the numerical simulations, as for the inversion of the seismic data or the treatment of the basic lines of CO₂. Quite as the seismic monitoring 3D and 4D has already made it, the development of new technologies with strong integration character as the measure of the subsidence by radar interferometry may develop still the conception of the predictive models by appealing in some more of geomechanics in one model originally conceived by fluid mechanics. However, all these models derived of “black oil” simulators still carry in them axes of intrinsic improvement: we can think in particular of algorithms of matching based on the correlation between the side variations of facies and the compressibility of the rock and the pores, two parameters were often globalized in the geological models.

Beyond this undeniable technical interest in which oil techniques and techniques relative to CO₂ storage join, we shall note that the requirement of reliability of the predictive methods has not only for cause the need to plan of best possible of the investments and the operating costs bound directly to a production, but it also answers a heavy tendency of our society which is more and more concerned by the notion of industrial risk. So, the regulations in the course of definition relative to the CO₂ storage show a procedural heaviness: both during the phase of injection and before retrocession to the State of the concession of storage, a third party expert can be appointed by the Administration in charge of the ground, to verify on one hand the quality of the geologic modelling (taken into account exhaustivity of the “static” data) and of its update, on the other hand, the robustness of the predictive numeric simulations and their calibration on the short term (phase of injection) and the long term (validation of the supposed phenomenologies).

Also, it seems clearly that the project of EOR-CO₂ Weyburn, started in September, 2000 in a field presenting a large number of well the cementations of standard quality of which could potentially affect the tightness of the caprock, and its associated concept of monitoring – “Weyburn CO₂ system” integrating the environmental control of underground waters up to surface, as well as atmosphere – weighed of all their weight of international reference for the establishment of basic lines of CO₂ geochemical monitoring, now systematized.

So, the industrial domains relative to the underground have to integrate well upstream into their scientific domains the principles of multidisciplinary calibration to increase the reliability of the predictive tools.

To the geologic unknown, only a greater control of the uncertainties is able to answer by the implementation of adequate techniques of monitoring and their integration in the chains of simulation.

Gilles Kimmerlin
Member of Editorial Committee of OGST

Gilles Munier
Chief Executive Officer of Geogreen