

[Accueil](#) ▶ [Tous les numéros](#) ▶ [Volume 191 \(2020\)](#) ▶ [BSGF - Earth Sci. Bull., 191 \(2020\) 8](#) ▶ [HTML complet](#)

Accès libre

Problème	BSGF - Earth Sci. Taureau. Volume 191, 2020
Numéro de l'article	8
Nombre de pages)	15
EST CE QUE JE	https://doi.org/10.1051/bsgf/2020004
Publié en ligne	09 mars 2020

BSGF - Bulletin des sciences de la Terre 2020, 191, 8

Article régulier

Une nouvelle méthode pour prédire la distribution de schiste de la Formation de Wufeng dans la région du Yangtsé supérieur, Chine

 Shasha Sun^{1, 2 *}, Linna Zhang³, Hongyan Wang^{1, 2}, Dazhong Dong^{1, 2} et Rong Zhang⁴
¹ Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, Chine

² Unconventional Oil & Gas Key Lab, PetroChina, Langfang, Hebei 065007, Chine

³ Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, Chine

⁴ Institut de recherche sur l'exploration et le développement de la Xinjiang Oilfield Branch Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, Chine

 * Auteur correspondant: sunshasha501@163.com

Reçu: 5 juillet 2019 Accepté: 19 janvier 2020

Abstrait

Prenant comme exemple le schiste de la formation de Wufeng de l'Ordovicien supérieur (WFF) dans la région du Yangtsé supérieur, nous avons effectué une distribution de lithofaciès, une quantification de l'épaisseur et une reconstruction paléo-topographique des zones de graptolites de l'Ordovicien supérieur. Plus précisément, nous nous sommes concentrés sur la fin Katian *Dicellograptus complexus* et le début des Hirnantien *Metabolograptus extraordinarius* dans un cadre chronostratigraphique, en utilisant le Système d'Information Géographique (SIG) et 310 coupes stratigraphiques (y compris forage) obtenues à partir de la Base de Données Géobiodiversité (GBDB). La reconstruction de la distribution géographique indique que le WFF et les sédiments synchrones dans la région du Yangtsé supérieur contiennent 8 unités lithostratigraphiques, qui sont géographiquement réparties dans 7 provinces / municipalités et ne présentent pas de variations significatives de lithofaciès. Le schiste graptolite noir s'étend en large andain d'est en ouest à l'intérieur du bassin, tandis que les autres lithofaciès déposés au cours de la même période sont présents à la périphérie du bassin. Toutes ces strates ont été déposées dans un environnement marin épicontinental néritique normal, à l'exception des sédiments flysch dans le sud du Hunan. La reconstruction d'épaisseur implique une comparaison de trois méthodes d'interpolation spatiale, y compris la pondération de distance inverse (IDW), le krigeage et la fonction de base radiale (RBF). Sur la base d'une vérification générale, l'IDW est considérée comme la méthode optimale car elle présente l'écart-type et la variance minimaux. Sur la base des contours obtenus à partir du modèle IDW, on estime que le schiste noir WFF a une superficie globale de $0,67 \times 10^6 \text{ km}^2$, une épaisseur moyenne de 6,2 m et un volume total de 3902 km^3 . Ce schiste a été déposé

Table des matières

Article

[Abstrait](#)
[HTML complet](#)
[PDF \(6,236 Mo\)](#)
[ePUB \(5,127 Mo\)](#)
[Les références](#)

Métrieque

[Afficher les statistiques de l'article](#)

Prestations de service

Mêmes auteurs

[- Google Scholar](#)
[- Base de données EDP Sciences](#)
[- PubMed](#)
[Recommander cet article](#)
[Envoyer sur mon Kindle](#)
[Télécharger la citation](#)

Articles Liés

[Creuser dans les stocks ancestraux des lignées jurassiques: ostracodes \(crustacés\) des monticules d'éponges carnien \(Trias supérieur\) de la Formation de Maantang \(Chine du Sud\)](#)

BSGF - Earth Sciences Bulletin 2019, 190, 9

[Recherche de plus de 50 ans sur les phlébotomes \(Diptera: psychodidae\) en Chine \(1915-1995\). I.](#)

Parasite de [taxonomie et de distribution zoogéographique](#), 1997, 2, 107-126

[Colza en Chine](#)

OCL 2016, 23 (6) D605

Plus

Bookmarking


[Services aux lecteurs](#)
[Alerte email](#)
[Haut](#)
[Abstrait](#)

sur une période de 2,83 Ma. Par conséquent, le volume de schiste déposé par million d'années est estimé à $1379 \text{ km}^3 / \text{ma}$ et l'épaisseur moyenne de schiste déposée par million d'années est de $2,37 \text{ m} / \text{ma}$. Les valeurs de profondeur de l'eau de la paléo-eau hirnantienne obtenues à l'aide de 275 sections ont été utilisées pour déduire la paléo-topographie Katienne tardive. Ces résultats suggèrent que la plate-forme du Yangtze était entourée d'anciens hauts plateaux à l'ouest, au sud et au nord, présentant un cadre paléo-géographique caractérisé par un soulèvement et quatre dépressions. Ce paramètre a bloqué la circulation de l'eau, ce qui a contraint l'eau à être contenue et à former un environnement marin fermé et restreint, qui était l'un des principaux facteurs contrôlant le dépôt du schiste WFF riche en matières organiques. Avec l'avènement de l'ère géologique du Big Data, la méthodologie de la technologie SIG est facilement exportable vers n'importe quel jeu de ressources ayant un modèle de distribution spatiale.

Mots clés: Formation de Wufeng / interpolation spatiale / reconstruction de la distribution / gaz de schiste / paléo-topographie

© S. Sun et al., Edité par EDP Sciences 2020



Il s'agit d'un article en libre accès distribué sous les termes de la licence d'attribution Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui permet une utilisation, une distribution et une reproduction sans restriction sur tout support, à condition que l'œuvre originale soit correctement citée.

1. Introduction

Après une décennie de préparation initiale et de tests industriels (Zou et coll., 2015), l'industrie chinoise du gaz de schiste a déclaré une production de 7,8 milliards de m^3 en 2016, ce qui en fait le troisième producteur mondial, avec une production cumulée allant jusqu'à 12 milliards de m^3 . Le bassin du Sichuan, dans la région du Moyen-Haut Yangtze, est un lieu courant d'exploration du gaz de schiste en Chine. Dans cette zone, une grande quantité de gaz de schiste est récupérée de la section stratigraphique s'étendant de la formation de l'Ordovicien supérieur de Wufeng (O_3w) à la formation silurienne Llandovery Longmaxi (S_1l) (Zou et al., 2015). Actuellement, l'exploration et la mise en valeur du gaz de schiste dans ce bassin ont ciblé des sous-couches. Après plusieurs années d'efforts, l'industrie a déterminé que la zone de graptolites WF2-LM5 dans la zone O_3w-S_1l est une cible favorable pour le développement du gaz de schiste (Chen et coll., 2015).

De nombreux chercheurs ont déterminé que le schiste de la Formation de Wufeng (WFF), situé au fond de la zone de ciblage WF2-LM5, a des propriétés de réservoir extrêmement hétérogènes et des épaisseurs dans les directions latérale et verticale, un réservoir favorable pour l'accumulation de gaz de schiste (Zou et al., 2015; Wang et coll., 2016; Yang et coll., 2016; Zou et coll., 2016; Chen et coll., 2017; Nie et coll., 2017). Le schiste WFF a présenté une maturité élevée, avec une valeur Ro de 2,0 ~ 3,5%, montrant une porosité totale élevée de 4,6 ~ 8,2%, et la perméabilité est de $0,0002 \times 10^{-3} \sim 0,5000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, développant des pores riches en matière organique et les micro-fissures. Au début de la période sédimentaire, avec le paléo-climat chaud et humide, une grande zone d'environnement sous-marin pauvre en oxygène s'est formée en raison de l'élévation du niveau de la mer. Avec les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ valeurs de $-30,2 \sim -29,9 \%$ et $\text{P}_2\text{O}_5 / \text{TiO}_2$ de 0,24 indiquant une eau de surface riche en nutriments, la productivité du plancton (*par ex.*, algues, radiolaires et graptolites) était élevée et des complexes de particules bioclastiques, de matière organique et de minéraux argileux se déposaient lentement dans une «neige marine» (Algeo et Lyons, 2006; Hammes et coll., 2011), formant des schistes argileux siliceux et siliceux riches en silice organique et biogénique avec un COT de 2,0 à 8,0%. Au cours des périodes sédimentaires moyen-tardives de la WFF, en raison de la baisse du niveau de la mer (environ 50 ~ 100 m), les graptolites se nourrissant de plancton se sont éteints, $\delta^{13}\text{C}$ a commencé à présenter une dérive positive, atteignant -29% à $-27,6 \%$. La valeur de $\text{P}_2\text{O}_5 / \text{TiO}_2$ atteint un sommet de 0,84 où la zone d'eau profonde déficiente en oxygène a été réduite à la zone de dépression dans les régions du sud-est-nord-est du Sichuan, avec un COT de 2,7 ~ 8,4%.

Cependant, sa distribution quantitative et son cadre paléo-géographique sont encore inconnus, ce qui entrave la prise de décision en matière d'exploration. Les études paléo-géographiques traditionnelles du WFF dans le sud de la Chine se sont principalement concentrées sur l'étude des lithofaciès et des biofaciès, *par exemple*, la carte paléo-géographique des lithofaciès (Feng et coll., 2001) et la carte de répartition des lithofaciès et biofaciès (Chen et coll., 2004). Cependant, ces cartes sont moins satisfaisantes du point de vue de la précision et de la qualité en raison du manque de points de données d'origine, de la subjectivité de la cartographie des contours d'épaisseur à l'aide de méthodes d'interpolation qualitative et artificielle traditionnelles et d'une analyse de la distribution spatiale inadéquate. Actuellement, les données sismiques

- 1. Introduction
- 2 Cadre géologique
- 3 Données et programmes
- 4 Analyse de la reconstruction
- 5 Analyse paléo-topographique
- 6. Conclusions
- Le financement
- Déclaration de disponibilité des données
- Remerciements
- Les références
- Liste des tableaux
- Liste des figures

disponibles ne sont pas suffisantes pour la demande d'exploration de précision du gaz de schiste. À l'heure actuelle, il n'existe pas de méthode fiable pour l'évaluation quantitative de haute précision à grande échelle du gaz de schiste.

Avec le développement rapide de l'informatique, la combinaison des bases de données et des méthodes du Système d'Information Géographique (SIG) offre une nouvelle solution pour mener des études paléogéographiques (Fan et coll., 2016). La base de données permet l'acquisition, le stockage et la gestion de quantités massives de données spatiales, et la méthode SIG fournit une interpolation spatiale qui peut prédire les attributs d'un point inconnu dans la zone d'intérêt à partir d'un point connu par extrapolation ou interpolation. La combinaison de ces outils permet l'utilisation efficace et objective de quantités massives de données pour déterminer la loi et fournit un outil puissant pour la restauration quantitative du modèle de distribution du schiste.

Dans cet article, en prenant le schiste WFF dans la région du Yangtsé supérieur dans le sud de la Chine comme exemple, nous avons reconstruit la distribution spatio-temporelle des lithofaciès à l'aide d'ArcGIS et des données pour 310 sections (y compris le forage) collectées à partir de la base de données de géobiodiversité (GBDB). Sur la base d'une comparaison détaillée, nous avons sélectionné la méthode d'interpolation optimale parmi trois méthodes courantes pour quantifier la distribution spatiale du schiste WFF. En outre, nous avons extrait des données de 275 sections pour déterminer la profondeur de la paléoeau et la paléo-topographie et reconstruit le cadre paléo-topographique 2D et 3D à l'aide de la méthode de Krigeage ordinaire d'ArcGIS. Nos résultats fournissent la base pour l'exploration et le développement précis du gaz de schiste dans le WFF, et fournissent donc une signification théorique réaliste.

Avec le développement et l'approfondissement de la recherche géoscientifique, la recherche géologique est progressivement entrée dans l'ère du «big data». Face aux données géologiques massives, la méthodologie de la technologie SIG est facilement exportable vers n'importe quel jeu de ressources ayant un modèle de distribution spatiale. À l'exception de la reconstruction paléogéographique, l'épaisseur des strates, la composition minérale de la roche, le COT, la réflectance de la vitrinite et d'autres paramètres géochimiques peuvent être appliqués avec ce moyen pour la recherche quantitative. Les résultats peuvent être générés à partir de données géologiques fournissant un moyen quantitatif rapide et efficace pour l'évaluation.

2 Cadre géologique

La région du Haut Yangtze est bordée au nord par la faille sur la marge sud du Qinling, au sud par la faille Yadu-Ziyun-Luodian, à l'ouest par le système de failles de Longmenshan et à l'est par les montagnes Xuefeng.

La région couvre une superficie totale d'environ $3,5 \times 10^5 \text{ km}^2$ (Deng, 2013). Le bassin du Sichuan est la partie principale de la zone d'étude, mais il contient également les régions du nord du Yunnan-Guizhou, de l'est de Chongqing-est du Hunan-Hubei et du nord du Guizhou-centre du Guizhou autour du bassin.

Le bloc du Yangtsé était situé dans une zone tropicale à subtropicale sur la marge ouest du Gondwanaland pendant l'Ordovicien supérieur. En plus du soulèvement et de l'expansion des terres anciennes et du paléosoulèvement, la mer supérieure du Yangtsé s'est fermée. La plate-forme du Yangtsé est passée d'une structure moins profonde à l'ouest et plus profonde à l'est à un bassin marin néritique post-soulèvement, semi-restreint, qui était entouré à l'ouest, au sud et au nord par trois zones surélevées, à savoir le centre Le soulèvement du Sichuan, le soulèvement du nord du Sichuan et le soulèvement du centre du Guizhou-Xuefeng, et ont plongé doucement vers le nord-ouest, formant une dépression (Mou et coll., 2014). À l'intérieur du bassin, la distribution de la ceinture de faciès sédimentaires et la provenance ont été contrôlées par ces soulèvements. La fermeture au sud et la connexion à l'océan Qinling ont permis la formation d'un bassin marin néritique semi-fermé, entraînant la répartition du schiste WFF sur une large zone (Mu, 1954; Rong et Chen, 1987; Feng et coll., 2001).

L'Ordovicien supérieur WFF a été nommé par Sun Yunzhu en 1931 sur la base de l'échantillon de graptolite récupéré dans la section de Wangjiawan, ville de Yuyangguan, province du Hubei (Mu, 1954). Plus tard, plus d'une décennie d'études sur les pratiques d'exploration et de mise en valeur du gaz de schiste a produit une quantité massive de données stratigraphiques, paléontologiques, paléogéographiques et géochimiques. Dans la région du Yangtsé supérieur, le WFF a été déposé pendant l'Ordovicien, du Katien supérieur au début de l'Hirnantien, soit sur 3,19 Ma de 444,43 Ma à 447,62 Ma. Ce processus a conduit au développement de quatre zones de graptolites en deux étapes (Chen et al., 2015) (Fig.1), c'est-à-dire de bas en haut, le *Dicellograptus complanatus*, *Dicellograptus complexus* et *Paraorthograptus pacificus* dans la partie supérieure du stade katien, et *Normalograptus extraordinarius* à la base du stade hirnantien. Le WFF repose sur la Formation de Linxiang et est séparé de la Formation de Longmaxi sus-jacente par un calcaire argileux à faciès de coquille à couche mince, connu sous le nom de couche de Guanyinqiao.

Certaines formations qui ont été déposées de manière synchrone mais avec des lithofaciès différents de ceux du schiste WFF comprennent les formations de Daduhe, Tiezufeike, Nanzheng, Tianmashan et Tianlingkou (Fan et al., 2016) (Fig.1). Le schiste WFF est réparti sur une vaste zone au sein de la plate-forme Yangtze et varie de 6 à 20 m d'épaisseur. Il est composé de schistes à couches minces, de roches siliceuses et de schistes

carbonés et siliceux, intercalés avec de multiples couches de tuf volcanique. Cette formation contient des graptolites abondants, quelques brachiopodes à coquille phosphatée, des trilobites et des brachiopodes présents au sommet et des radiolaires dans les roches siliceuses. La formation de Daduhe se compose principalement de dolomite intercalée avec du schiste et est présente dans le nord-est du Yunnan et le sud-ouest du Sichuan (Tang, 2017). La Formation de Tiezufei est distribuée à Butuojinyang, dans l'ouest du Sichuan (Tang, 2017), avec la lithologie du calcaire dolomitique gris noir et de la dolomie. La formation de Dajing se compose principalement de calcaire dolomitique et de dolomie calcaire et est répartie dans le nord-est du Yunnan et le sud du Sichuan (Tang, 2017). La formation de Nanzheng, qui a été déposée dans le nord du Sichuan, et la formation de Tianmashan, qui a été déposée dans le sud du Hunan, sont principalement composées de roches clastiques. L'interface basale du schiste WFF est à peu près isochrone, tandis que l'interface supérieure est partiellement diachrone.

Fig. 1



Division et corrélation des strates de l'Ordovicien dans la région du Yangtsé supérieur (Zhang *et coll.*, 2014a). (A) la vaste zone de la région du Yangtsé supérieur contenant le schiste noir typique de la formation de Wufeng; (B) la zone s'étendant du nord du Sichuan au sud du Shanxi; (C) la zone s'étendant du sud-est du Sichuan au nord-est du Yunnan; (D) la zone s'étendant du sud-ouest du Hunan au nord-est du Guangxi.

3 Données et programmes

La combinaison de GBDB et de SIG permet l'extraction à grande échelle des données applicables, l'identification quantitative efficace, de haute précision et à grande échelle du modèle et de la loi de distribution spatiale, et la performance de l'analyse de prédiction. Cette méthode comprend deux étapes: la préparation des données et la modélisation des données.

3.1 Préparation des données

La modélisation de haute précision de la distribution spatiale et temporelle des strates sur une vaste zone nécessite un ensemble de données massif. Bases de données stratigraphiques et paléontologiques à grande échelle, telles que la GBDB (Fan *et coll.*, 2013), ont été compilées ces dernières années et constituent un outil utile pour l'investigation, l'acquisition, l'édition, la gestion, le téléchargement et l'application de données à grande échelle, standard et quantitatives. Le GBDB a été créé en 2006 par une équipe de recherche de l'Institut de géologie et de paléontologie de Nanjing, Académie chinoise des sciences. La GBDB fournit une plate-forme de recherche scientifique numérique axée sur les sections pour les études paléontologiques et stratigraphiques basées sur Internet, des bases de données et des SIG, et est devenue la plus grande base de données stratigraphique au monde et la deuxième plus grande base de données paléontologique (Fan *et al.*, 2016; Zhang *et coll.*, 2016).

Les données utilisées dans cet article ont été principalement collectées à partir d'articles scientifiques, de rapports géologiques régionaux, d'ouvrages géologiques, de la GBDB et d'observations de base. En recherchant, collectant, préparant et analysant les données de la GBDB, un total de 257 points de coupe dans le schiste WFF et les strates synchrones de la région du Yangtsé supérieur ont été sélectionnés et exportés à partir de la GBDB dans le format requis par le modèle. En utilisant les résultats de forage de gaz de schiste dans le sud de la Chine, sur la base des observations de carottes et de la collecte de données, 18 puits ont été déterminés pour fournir un contrôle sur l'épaisseur de la zone de graptolite. De plus, en raison d'un manque de données dans la GBDB sur les formations de Daduhe et Dajing sur la marge ouest de la région du Yangtsé, 35 coupes stratigraphiques ont été collectées dans la littérature (Tang, 2017). Au total, 310 points de données ont été collectés dans 7 provinces / municipalités, à savoir le Sichuan, Chongqing, le Yunnan, le Guizhou, le Hubei, le Hunan et le Shaanxi (Fig. 2). Parmi ces points de données, 179 proviennent du schiste WFF, 60 proviennent des autres strates synchrones et 71 indiquent l'absence de la formation. Les statistiques révèlent que l'épaisseur du WFF varie de 0 à 40 m avec une moyenne de 4,1 m.

Les sections utilisées dans cette étude peuvent être divisées en trois types: (1) sections comprenant le schiste noir WFF; (2) sections comprenant des formations déposées de manière synchrone avec le schiste WFF, mais avec des lithofaciés différents; et (3) des sections qui n'incluent pas de sédiments similaires au schiste WFF. Les points de données pour le WFF et les formations synchrones peuvent être utilisés pour déterminer la gamme de distribution des différents lithofaciés, tandis que les points de données pour l'absence de ces formations offrent l'occasion de définir la frontière du continent marin au moment et la gamme du zone qui a initialement reçu des sédiments, mais qui a ensuite été érodée (Fan *et al.*, 2016). Les données d'objet pour l'interpolation comprennent: (1) la position géographique, c'est-à-dire, longitude et latitude (doit), altitude et unité administrative de division; (2) les attributs, c'est-à-dire le nom de l'unité lithostratigraphique (ou de l'absence), l'épaisseur de la formation, les paramètres d'analyse et d'essai, et d'autres données spatiales

discrètes; et (3) remarques, instructions auxiliaires et sources de données. En général, plus le volume du point de données objet utilisé pour l'interpolation est grand, plus sa distribution spatiale est uniforme et meilleur est l'effet de l'interpolation.

Fig. 2



Distribution géographique des points de coupe du schiste de la Formation de Wufeng et des strates synchrones dans la région du Yangtsé supérieur (Les cercles jaunes représentent la Formation de Wufeng et les points des strates synchrones; les croix orange représentent les sections qui ne contiennent pas ces formations; la ligne brune décrit le bassin du Sichuan et la ligne rouge décrit la région du Yangtsé).

3.2 Modélisation des données

Le SIG fournit un système informatique pour l'entrée, le stockage, l'interrogation, la gestion, le calcul, l'analyse, le déplacement et la description des données de répartition géographique dans l'espace terrestre (Chen *et coll.*, 1999 ;Tsong, 1999), qui permet le stockage spatial et la cartographie rapide du volume de données géologiques ainsi que l'analyse et la modélisation des données spatiales. Le SIG a été fréquemment appliqué dans plusieurs domaines, tels que l'exploitation minière, l'environnement, l'hydrologie, la géochimie, les services de localisation mobile et la modélisation géologique.

En substance, l'interpolation spatiale basée sur le SIG est théoriquement basée sur la loi de "similarité et de proximité" et s'est avérée efficace pour ajuster la fonction de la position spatiale et de la valeur d'attribut en utilisant des données discrètes limitées pour prédire les caractéristiques d'attribut à un point inconnu dans un corps géologique et d'explorer le modèle et la loi de distribution spatiale (Zhang *et al.*, 2016). Comparé aux pratiques traditionnelles qui déterminent le contour à l'aide d'une interpolation artificielle, le SIG offre une objectivité, une quantification et une analysabilité améliorées, ce qui en fait un outil puissant pour déterminer la distribution stratigraphique spatiale et temporelle quantitative et précise de quantités massives de données de coupe contenant des informations de position géographique et pour analyser ces données (Zhang *et coll.*, 2016).

L'objectivité signifie que le résultat de l'interpolation est donné par le calcul sous la forme d'une équation mathématique. Ce processus est rapide et précis et est moins affecté par la subjectivité humaine. Pour le même algorithme d'interpolation et les mêmes paramètres, différents opérateurs peuvent donner le même résultat d'interpolation, démontrant la répétabilité et la répliquabilité de la méthode. Une quantification précise signifie que les cartes préparées en fonction de la quantité massive de données sont de haute résolution et de haute précision dans le temps et dans l'espace, ce qui permet l'identification précise de l'interface entre les différents lithofaciès. L'analysabilité fait référence à la quantification de la position spatiale et de l'attribut, à la dérivation rationnelle des inconnues et à l'analyse ultérieure. Par exemple, il est possible de calculer la zone de distribution et le volume, et même le rapport de variation de l'épaisseur selon une certaine direction. De plus, il permet de prédire les points sensibles et les ressources du gaz de schiste en utilisant le carbone organique total (COT) et la porosité du schiste et augmente la précision et la profondeur de toutes les études connexes.

Dans cette étude, nous avons reconstruit les lithofaciès géographiques, analysé et inspecté la distribution des épaisseurs, et mené une modélisation topographique spatiale du WFF à l'aide d'Arc GIS, un logiciel de la société ESRI. La qualité des résultats d'interpolation spatiale dépend de la qualité des données et de la méthode d'interpolation. Si la qualité des données est fixe, le logiciel propose diverses méthodes d'interpolation. Dans cette étude, nous avons sélectionné la méthode d'interpolation optimale basée sur les conditions de données réelles de la reconstruction de la distribution des lithofaciès et de l'analyse associée.

4 Analyse de la reconstruction

4.1 Reconstruction de la distribution des lithofaciès

Un total de 310 sections (contenant 8 unités litho-stratigraphiques) ont été collectées pour identifier la répartition géographique du WFF dans la région du Yangtsé supérieur, y compris 179 sections (dont 18 sections de forage) du WFF, 60 sections de strates synchrones avec différents lithofaciès et 71 sections qui ne contenaient pas de strates synchrones (Tab. 1).

Ces coupes ont été projetées sur la carte d'administration de la région du Yangtsé supérieur, qui, en fonction de leur lithologie et de leurs propriétés paléontologiques, peut être divisée en quatre types (Fan *et al.*, 2016) (Fig.3).

Tableau 1 Nombre de sections utilisées dans la reconstruction de la Formation de Wufeng et des formations synchrones avec différents lithofaciès.



Fig. 3

Répartition géographique de la formation de Wufeng et des formations synchrones avec différents lithofaciès dans la région du Yangtsé moyen-supérieur.

4.1.1 Type A

Ce type de section contient du schiste noir WFF typique, qui contient du graptolite de l'Ordovicien supérieur. Sur la [figure 3](#), le type A1 est la zone de faciès de schiste calcaire à haute teneur en carbonate, et le type A2 est la zone de faciès de schiste siliceux à haute teneur en minéraux siliceux.

4.1.2 Type B

Ce type de section contient des roches carbonatées synchrones. Dans la [figure 3](#), le type B1 est le schiste de la formation de Nanzheng intercalé avec du calcaire dans le nord du Sichuan, qui consiste en un mélange de sédiments contenant des graptolites, des brachiopodes et des siphonopodes ([Fan et al., 2016](#)), et représente un environnement de faciès plat côtier. Le type B2 est le schiste noir au faciès plat de marée intercalé avec du calcaire et intercalé avec le calcaire des formations Daduhe et Tiezufeike dans la région ouest du Sichuan ([Deng, 2013](#)).

4.1.3 Type C

Ce type de coupe montre la présence de roches clastiques synchrones, constituées des sédiments flysch des formations de Tianmashan et Tianlingkou, qui ont permis le développement de schistes sableux (limoneux).

4.1.4 Type D

Ce type de section est principalement situé dans les terres anciennes de Hannan, du centre du Sichuan et du centre du Guizhou à la périphérie des zones de dépôt du WFF et d'autres formations synchrones et dans certaines des régions de la plate-forme du Yangtsé supérieur, comme le Hunan- Hautes terres sous-marines de l'ouest du Hubei ([Chen et coll., 2001](#)) à la frontière Hubei-Hunan et dans plusieurs régions isolées s'étendant du nord du Guizhou au sud de Chongqing ([Rong et coll., 2011](#)).

Dans la région du Yangtsé supérieur, le schiste graptolite noir WFF est largement réparti sur toute la plate-forme du Yangtsé, tandis que les autres formations synchrones avec des lithofaciès différents sont réparties le long de la marge. La zone de schiste est bordée au nord par la ceinture orogénique Qinling-Dabieshan et la faille de Tanlu et à l'ouest, au sud et au sud-est, soit par les terres anciennes, soit par l'absence de formation. Géographiquement, il s'étend sur 7 provinces / municipalités, dont l'est et l'ouest du Sichuan, l'extrême sud du Shaanxi, l'est de Chongqing, le nord-est du Yunnan, le nord du Guizhou, la partie principale du Hubei et le centre et le nord du Hunan. Ces zones se trouvaient dans un environnement marin épicontinental néritique normal, à l'exception des centaines de mètres de sédiments flysch dans la roche clastique de la Formation de Tianmashan dans le sud du Hunan, [Ge, 2013](#)). De plus, les sections dépourvues de formation peuvent être utilisées pour définir précisément la frontière du continent marin à ce moment-là.

4.2 Restauration de la distribution d'épaisseur de la formation

Sur la base de l'ensemble de données contenant 310 sections collectées pour étudier la répartition géographique, un sous-ensemble comprenant 248 sections (dont 177 points de données pour le WFF et les formations synchrones, et 71 sans formation) a été extrait, dans lequel chaque point de données avait un épaisseur. Pour déterminer la distribution d'épaisseur du schiste WFF, il a été nécessaire de régler l'épaisseur des formations synchrones avec différents faciès et la section du point d'absence de formation à 0 dans l'interpolation et de s'assurer que l'épaisseur du WFF reste constante. ArcGIS propose une variété de méthodes d'interpolation, chacune ayant sa propre applicabilité et ses propres limites. Afin de sélectionner la meilleure méthode pour l'interpolation de l'épaisseur du WFF dans la région du Yangtsé supérieur, *c'est-à-dire* les méthodes de pondération de distance inverse, de krigeage et de fonction de base radiale. La méthode optimale a été sélectionnée par vérification générale et a été utilisée pour l'interpolation et l'extrapolation.

4.2.1 Méthodes d'interpolation

4.2.1.1 Pondération inverse de la distance (IDW)

La méthode IDW est une méthode d'interpolation précise basée sur la loi «similarité et proximité», qui est la première loi de la géographie ([Tobler, 1970](#)). Cette méthode est simple à comprendre. Plus le point connu

est proche du point d'interpolation, plus le poids est élevé. IDW considère l'autocorrélation spatiale, qui dépend directement de la puissance de la distance et de la zone de chasse du quartier. La variation de distance modifie le poids de l'inconnu et la zone de chasse du quartier contrôle le nombre et le mode des points d'échantillonnage. Cette méthode est relativement applicable aux cas dans lesquels les données d'échantillonnage sont étroitement espacées et sont distribuées uniformément. La méthode IDW donne des résultats d'interpolation compris entre les valeurs maximale et minimale. Cependant, le poids, l'uniformité et les données anormales peuvent entraîner l'apparition de l'effet «œil de vache», c'est-à-dire l'apparition de petits anneaux de contour fermés.

4.2.1.2 Krigeage

La méthode Kriging est une méthode d'interpolation statistique qui décrit la structure et le caractère aléatoire. Il utilise un semi-variogramme pour effectuer une estimation optimale linéaire sans biais de la variation régionale (Dim, 1990). La méthode de krigeage prend en compte la corrélation de la prédiction et des points connus et l'autocorrélation spatiale et la variation aléatoire de la variable. L'analyse des erreurs est également possible avec cette méthode. Il existe différents types de krigeage, qui peuvent être appliqués à différents objets et caractéristiques de données statistiques. La méthode de krigeage ordinaire, qui est la plus utilisée, est adoptée dans notre étude. Bien que l'interpolation de krigeage ne produise pas d'effets de bord, c'est une méthode d'estimation optimale locale qui accorde moins d'attention à la corrélation spatiale globale. Par conséquent, cette méthode est applicable aux cas dans lesquels il existe une forte autocorrélation spatiale et les points d'échantillonnage sont étroitement distribués. Le résultat d'interpolation statistique basé sur la probabilité peut être supérieur ou inférieur à la valeur extrême des points d'échantillonnage.

4.2.1.3 Fonction de base radiale (RBF)

La méthode RBF est également connue sous le nom de réseau neuronal à base radiale, qui est une méthode d'interpolation précise pour prédire des valeurs supérieures à la mesure maximale et inférieures à la mesure minimale. Essentiellement, il s'agit d'une méthode d'interpolation qui utilise la technologie d'approximation stochastique, qui applique la récursivité à l'algorithme d'apprentissage de la propagation arrière, pour créer et prédire une surface lisse avec un grand nombre de points de données d'échantillons connus sur la base de la douceur. La méthode RBF est considérée comme présentant un problème d'ajustement de surface dans les espaces de grande dimension, ce qui équivaut à la méthode de réseau neutre simple et présente les avantages d'un format de calcul simple, d'une configuration de nœud flexible, d'une petite quantité de calcul et d'une précision relativement élevée (Han et coll., 2011). Dans le cas où la surface varie doucement, cette méthode fournirait un bon effet. Cependant, dans le cas où la surface varie fortement sur une courte distance et / ou les valeurs de l'échantillon sont suspectées d'avoir des erreurs de mesure ou des incertitudes, cela n'est pas applicable.

4.2.2 Comparaison des modèles d'interpolation

Afin de déterminer les influences des différentes méthodes d'interpolation sur les résultats de cartographie, nous avons comparé les trois méthodes. Les paramètres requis pour chaque méthode sont définis dans l'assistant géostatistique du module d'analyse géostatistique. Dans la méthode IDW, la puissance était de 2, 12 points étaient impliqués dans l'interpolation, le voisinage était l'outil standard et la taille du pixel de sortie était de 4149. Dans la méthode de krigeage, la méthode de krigeage ordinaire a été adoptée, la fonction sphérique a été utilisée comme modèle de fonction semi-variogramme, la longueur de pas était de 34 082 et le numéro de pas était de 12. Dans la méthode RBF, la spline de tension a été sélectionnée comme type de fonction, le nombre maximum d'éléments adjacents était de 15, le minimum adjacent le numéro d'élément était 10, et les autres paramètres étaient définis par défaut.

La figure 4 montre la distribution surfacique des points d'épaisseur du WFF. Les sections WFF sont réparties largement, mais de manière non uniforme dans la région du Yangtsé supérieur. La formation affleure principalement à la périphérie du bassin du Sichuan, comme dans le nord du Guizhou et l'ouest du Hubei. Cependant, très peu de carottes récupérées dans le bassin révèlent sa présence. De plus, l'épaisseur du WFF varie considérablement même au sein d'une même région. Par exemple, dans le nord-est du Sichuan, l'épaisseur du schiste WFF passe de 32,3 m dans la section Chengkou Miaoba à 7 m dans le puits WX2 à Wuxi (Liang et coll., 2016). En outre, l'épaisseur du schiste WFF diminue de 40 m dans la section Jiuxi Taoyuan dans la région Hunan-ouest du Hubei à 0 m dans la section voisine de Cili Yichongqiao dans la province de Hubei en raison de la présence des hautes terres sous-marines du Hunan-ouest du Hubei.

Sur la base des données d'épaisseur pour le FFM (fig. 4), les contours d'épaisseur générés en utilisant le IDW, krigeage et les méthodes de RBF sont présentés dans les figures 5 - 7, respectivement. Comme le montre la figure 5, la méthode IDW fournit une interpolation précise avec des réglages de principe et de paramètres relativement simples et fournit des données d'interpolation cohérentes avec les données originales connues. Cette méthode nécessite que les points de données soient distribués aussi

uniformément que possible. Le résultat d'interpolation donné par cette méthode est toujours précis dans les zones où les points de données anormaux varient considérablement, comme dans la zone de valeurs extrêmes. Par conséquent, il est applicable dans les zones où l'épaisseur de la formation est significativement supérieure à celle des zones environnantes, comme dans les sections Chengkou Miaoba, Taoyuan Jiuxi, Jishou et Anhua Yanxi. Cependant, l'effet «oeil de vache» est susceptible d'apparaître dans la zone de valeur extrême des données, formant de multiples petits cercles de contour fermés autour des valeurs extrêmes.

La figure 6 montre deux caractéristiques de l'interpolation de krigeage. Premièrement, comme la méthode de Krigeage ordinaire est une interpolation de probabilité plutôt qu'une interpolation précise, elle fournit un résultat d'interpolation qui n'est pas identique à l'épaisseur des données originales connues. Deuxièmement, puisque l'algorithme de Krigeage prend en considération la relation entre la position du point de prédiction et la position connue et la corrélation spatiale des données d'épaisseur, le résultat de l'interpolation fournit une bonne représentation de la tendance de variation globale dans les données, *par exemple* en prédisant la fusion. répartition régionale de la formation à lit épais dans le centre du Hunan.

La figure 7 montre deux caractéristiques de l'interpolation RBF. Premièrement, comme le RBF est une interpolation précise, il permet la génération d'une surface lisse avec de nombreux points de données, au lieu de prédictions entre les valeurs maximale et minimale connues. Ainsi, l'interpolation donne un contour lisse et continu. Deuxièmement, étant donné que l'épaisseur varie considérablement et que les points de données sont répartis uniformément dans le centre et le nord du Hunan, il n'y a pas de répartition fusionnée de la formation dans les zones dépourvues de sections, et la méthode est d'une utilité limitée dans les zones où les données varient considérablement localement. .

Une comparaison de ces cartes d'interpolation révèle que les résultats d'interpolation sont étroitement liés à l'espacement et à la variation des points de données. Les résultats d'interpolation sont légèrement différents dans les zones avec des points de données étroitement espacés, comme dans le sud-ouest du Sichuan, le nord-est du Yunnan, le nord du Guizhou et l'ouest du Hubei, alors qu'ils sont significativement différents dans les zones avec des points de données largement espacés, comme dans le centre du Guizhou, au centre Sichuan et le centre de Chongqing. En outre, les résultats d'interpolation sont significativement différents dans les zones où les points de données varient considérablement et fréquemment, y compris dans l'ouest du Hunan-Hubei, alors qu'ils sont légèrement différents dans les zones où les points de données varient légèrement, comme dans le sud du Sichuan. En général, la méthode IDW convient pour une utilisation avec des données distribuées de manière continue et uniforme, la méthode de krigeage fournit un meilleur reflet de la tendance de variation globale des données, et la méthode RBF est moins efficace dans les zones où les données varient considérablement. Toutes ces méthodes donnent de bons résultats d'interpolation pour des données uniformément distribuées et des valeurs légèrement variables.

Pour mieux refléter les variations latérales de ces résultats d'interpolation, les cinq liés section puits latéral (puits W202, N203, jy1, WX2, et J101) (Fig. 8) et un diagramme de corrélation croisée puits (Fig. 9) ont été construits . L'emplacement de la section est représentée sur les figures 5 - 7 . Puisque la méthode IDW est la méthode d'interpolation précise, le contour d'épaisseur bleu passe toujours par les données d'origine (cercles jaunes sur la Fig.9). Les contours générés à l'aide des méthodes de krigeage et RBF passent rarement par les points de données d'origine. La méthode de krigeage est la méthode d'interpolation de probabilité, et par conséquent, elle fournit des résultats d'interpolation significativement différents de ceux des autres méthodes dans les zones qui n'ont pas le contrôle des points connus. En général, ces 3 méthodes donnent des résultats d'interpolation significativement différents dans des zones avec des points de données largement espacés, comme la première moitié de la région (700-830 km) entre le puits WX2 et le puits J101 de la figure 9 , en particulier pour la méthode de krigeage, qui fournit des résultats d'interpolation significativement différents. Dans la seconde moitié de la région (830-1 000 km), qui a des points de données uniformément répartis et étroitement espacés, il n'y a pas de différence significative entre les différents résultats d'interpolation.



Fig. 4

Position des points d'épaisseur des sections de la Formation de Wufeng dans la région du Yangtsé moyen-supérieur.

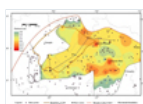
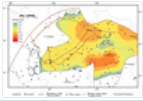


Fig. 5

Carte d'interpolation 2D de la Formation de Wufeng dans la région du Yangtsé moyen-supérieur réalisée à l'aide de la méthode IDW.

Fig. 6



Carte d'interpolation 2D de la Formation de Wufeng dans la région du Yangtsé moyen-supérieur réalisée à l'aide de la méthode de Kriging.

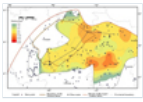


Fig. 7

Interpolation cartographique 2D de la Formation de Wufeng dans la région du Yangtsé moyen-supérieur réalisée à l'aide de la méthode RBF.



Fig. 8

Corrélation croisée de la formation de Wufeng dans la région du Yangtsé supérieur à travers les puits W202-N203-JY1-WX2-J101.



Fig. 9

Corrélation de l'interface latérale de la Formation de Wufeng dans la région du Yangtsé supérieur pour les 3 méthodes d'interpolation.

4.2.3 Sélection du modèle optimal

Pour déterminer le modèle optimal, il a été nécessaire de vérifier la précision des résultats d'interpolation donnés par les trois méthodes. L'inspection de précision est généralement effectuée *via* vérification croisée ou vérification générale. Dans cet article, la méthode de vérification générale est utilisée. L'ensemble de points d'apprentissage et l'ensemble de points de test sont sélectionnés à l'aide de l'outil d'élément de sous-ensemble de l'outil géostatistique. De plus, 75% des données de section servent de jeu de points d'apprentissage pour l'interpolation, tandis que les 25% restants des données de section servent de jeu de points de test, qui n'est pas impliqué dans le calcul d'interpolation. Ensuite, l'ensemble de points d'apprentissage est utilisé pour l'interpolation. Le résultat de l'interpolation de l'ensemble de points d'apprentissage est comparé à l'ensemble de points de test à l'aide de l'outil valeur à point de l'outil d'analyse spatiale. La différence entre les données connues et les données prédites est indiquée statistiquement, *c'est-à-dire*, comme l'écart type (SD) et la variance (Var), qui fournissent une mesure de la fluctuation des données. Un SD et un Var relativement petits suggèrent que les données sont proches de la moyenne et sont relativement précises, indiquant un bon effet d'interpolation. Après la vérification générale des trois méthodes, la différence entre les valeurs prédites et les valeurs originales a été déterminée à l'aide des indices de paramètres numériques statistiques. Sur la base des valeurs SD et Var minimales (Tab. 2), la méthode IDW produit le résultat d'interpolation le plus proche des valeurs d'origine et a la plus grande précision. Par conséquent, le modèle optimal peut être dérivé en utilisant la méthode IDW.

Tableau 2 Statistiques des trois méthodes d'interpolation.

4.3 Analyse de la loi spatiale

Sur la base de la sélection du modèle d'interpolation optimal, un modèle d'épaisseur tridimensionnel est reconstruit quantitativement (Fig. 10). Il s'agit du premier modèle d'épaisseur tridimensionnel reconstruit par la méthode quantitative dans la zone d'étude, où les paramètres pertinents du schiste noir sédimentaire peuvent être analysés.

Une carte d'épaisseur 3D du WFF a été dérivée de l'interpolation spatiale en utilisant la méthode IDW et la plate-forme Arcscene. Le schiste WFF est largement et continuellement réparti dans la région du Haut Yangtze et, en général, il s'amincit du sud-est au nord-ouest. L'épaisseur du schiste varie de 0 à 40 m, mais est généralement inférieure à 10 m, ce qui révèle une topographie relativement plate avec des changements topographiques dans des zones localisées. Cette carte montre que le schiste WFF est relativement épais dans trois zones, dont le nord-est de Chongqing, le centre du Hubei et le nord-ouest du Hunan. Ces zones entourent les hautes terres sous-marines de l'ouest du Hunan-Hubei à la frontière du Hunan et de l'ouest du Hubei. Dans ce plateau, le WFF est relativement mince et est même absent dans certaines zones en raison de la présence du soulèvement de Yichang. L'épaisseur de la formation augmente progressivement avec l'éloignement des hautes terres. L'épaisseur du WFF dépasse 5 m à la périphérie des hautes terres de l'ouest Hunan-Hubei avec un maximum local sur la marge ouest du soulèvement de Xufengshan dans le nord-ouest du Hunan, *par exemple*, à Jishou et Taoyuan. Cela est dû à la présence du dépo-centre du sud de la Chine au sud et à la transition du WFF sur la plate-forme aux sédiments du flysch de Tianmashan dans la dépression.

Sur la base des contours d'épaisseur, on a estimé que le schiste noir WFF avait une aire de distribution 2D de $0,67 \times 10^6 \text{ km}^2$, un volume total d'environ 3902 km^3 et une épaisseur moyenne interpolée de 6,2 m. Ce schiste a été déposé sur une période de 2,83 Ma. Par conséquent, le volume de schiste déposé par million d'années est estimé à $1379 \text{ km}^3 / \text{my}$ et l'épaisseur moyenne du schiste déposé par million d'années est de 2,37 m / my.

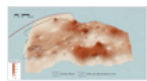


Fig. 10

Carte 3D montrant l'épaisseur dans la région du Yangtsé supérieur dérivée de la méthode IDW.

5 Analyse paléo-topographique

Dans le sud de la Chine, les strates hirnantiennes moyennes partagent un cadre paléo-topographique similaire avec les strates katiennes tardives sous-jacentes (Chen, 2013). Ainsi, il est possible de déduire la paléo-topographie de la dernière Katian WFF à partir de la paléo-topographie de l'Hirnantian. Considérant que la teneur en organismes bentoniques, *par exemple*, les brachiopodes, est un indicateur important de la profondeur paléo-eau, nous avons sélectionné la profondeur paléo-eau hirnantienne minimale comme valeur paléo-topographique pour la période Wufeng. Afin d'étudier les caractéristiques de distribution paléo-topographique du WFF dans la région du Yangtsé supérieur, un ensemble de données contenant 275 sections connexes (y compris les données de 18 puits) a été compilé. Cet ensemble de données comprenait les attributs suivants: nom de la section, longitude et latitude, lithologie et épaisseur. Basé sur le programme utilisé pour déterminer la profondeur de la paléo-eau indiquée dans le [tableau 3](#) (Zhang *et coll.*, 2016), nous avons prédit la profondeur paléo-eau de chaque section et choisi son minimum comme valeur paléo-topographique à déterminer.

Après avoir acquis la profondeur paléo-eau de toutes les sections, la méthode de krigeage ordinaire du modèle d'analyse géostatistique a été utilisée pour créer des cartes de profondeur paléo-eau 2D et 3D de la région du Yangtsé supérieur en utilisant les paramètres suivants: le krigeage ordinaire comme le krigeage type, le semi-variogramme comme modèle variable, la fonction sphérique comme modèle, 50 éléments adjacents maximum et autres paramètres par défaut.

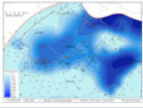
Sur la base de la 2D paléo-topographique carte restauré (Fig. 11) et la base ArcScene-3D paléo-topographique carte (Fig. 12), nous avons déterminé que la région du Yangtsé supérieur était généralement un environnement de la mer semi-fermée, neritic epicontinental avec relativement topographie douce bordée à l'ouest, au sud et au nord par d'anciennes hautes terres. La plate-forme était bordée à l'ouest par l'ancienne terre centrale du Sichuan, au sud par l'ancienne terre centrale du Guizhou, et au nord par l'ancienne terre Hannan, présentant un cadre paléo-géographique caractérisé par un soulèvement et quatre dépressions, telles que la dépression du sud-est du Sichuan, la dépression centrale du Hunan, la dépression du sud-est du Hubei, la dépression du nord du Hubei et les hautes terres sous-marines de l'ouest du Hunan-Hubei (Chen *et coll.*, 2001).

En raison de la présence des hautes terres sous-marines du Hunan-ouest du Hubei et des terres anciennes adjacentes, le plan d'eau a été bloqué, conservé et mal relié à la mer ouverte. Ce milieu marin fermé et restreint était l'un des principaux facteurs contrôlant l'enrichissement du schiste riche en matières organiques du WFF. Cet environnement d'eau réducteur presque complètement fermé est unique au monde. La formation de ce cadre paléo-géographique est le résultat du mouvement orogénique intracontinental dans les blocs du Yangtsé et de la Chine du Sud (Zhang *et coll.*, 2013). La convergence et la compression de ces blocs ont entraîné la formation de soulèvements locaux. Par exemple, le soulèvement de Yichang (Chen *et al.*, 2001) a conduit à la formation des hautes terres sous-marines de l'ouest du Hunan-Hubei et a directement influencé le développement de la zone de graptolite et du lit de schiste favorable.

Le puits LD1, qui a été foré par la China Huadian Corporation sur la marge des hautes terres sous-marines de l'ouest du Hunan-Hubei, a rencontré un mince lit de schiste graptolite (WF2-LM5 mesure 20,4 m d'épaisseur) avec des résultats insatisfaisants. Cependant, il a été signalé que plusieurs puits contenaient de bonnes quantités de gaz de schiste, y compris les puits N203, W202 et JY1 dans le sud-est du Sichuan et le puits J101 dans la dépression sud-est du Hubei. Par conséquent, il est recommandé que les puits de gaz de schiste soient placés dans des zones à l'intérieur de la dépression et loin de la zone de soulèvement.

Tableau 3 Programme pour déduire la profondeur de l'eau paléo en se basant sur la lithologie, la structure et les organismes bentoniques (Zhang *et al.*, 2014a ,b).

Fig. 11



Paléo-topographie 2D restaurée du Moyen Hirnantien-Late Katian dans la région du Yangtsé supérieur.

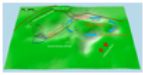


Fig. 12

Paléo-topographie 3D restaurée du moyen Hirnantien-Late Katian dans la région du Yangtsé supérieur.

6. Conclusions

Sur la base de l'analyse et de la discussion ci-dessus, nous sommes parvenus aux conclusions suivantes:

1. Par rapport à la cartographie d'interpolation artificielle traditionnelle, la cartographie d'épaisseur de haute précision basée sur la GBDB et le SIG élimine les inconvénients de la méthode d'interpolation artificielle traditionnelle par interpolation spatiale. Avec sa forte objectivité, ses grandes quantités de données, sa cartographie de haute précision et son haut degré de quantification, cette méthode permet une analyse quantitative ultérieure facile et la possibilité d'explorer le mode et la loi de distribution spatiale.
2. Dans la région du Haut Yangtze, le WFF et d'autres sédiments synchrones contiennent 8 unités lithostratigraphiques et sont présents dans 7 provinces. Le schiste graptolite noir est largement réparti d'est en ouest à travers le bloc du Yangtsé, tandis que les autres formations synchrones avec des lithofaciès différents sont présentes sur les marges de la plate-forme. Ces formations ont été déposées dans un environnement marin épicontinental néritique normal, à l'exception des sédiments flysch dans le sud du Hunan. Les sections qui ne contiennent pas ces formations permettent de déterminer avec précision la frontière marine-continent à l'époque.
3. Il n'y a pas de méthode d'interpolation optimale absolue qui soit généralement applicable à l'interpolation spatiale des données géologiques. Par conséquent, il est nécessaire de sélectionner la méthode d'interpolation idéale en fonction de la distribution des données d'origine et des conditions spécifiques de la zone d'étude. Nous avons comparé les résultats d'interpolation des méthodes IDW, Kriging et RBF. Basée sur une vérification générale, la méthode IDW est la méthode d'interpolation optimale et a la plus haute précision.
4. En utilisant la méthode IDW, on a estimé que le WFF dans la région du Yangtsé supérieur avait une épaisseur moyenne de 6,2 m, une superficie de $0,67 \times 10^6 \text{ km}^2$ et un volume de 3902 km^3 . Ce schiste a été déposé sur une période de 2,83 Ma. Par conséquent, le volume de schiste déposé par million d'années est estimé à $1379 \text{ km}^3 / \text{my}$, et l'épaisseur moyenne du schiste déposé par million d'années est de 2,37 m / my.
5. À la fin de la période Katian Wufeng, la plate-forme du Yangtsé était bordée par des terres anciennes à l'ouest, au sud et au nord, présentant un cadre paléo-géographique caractérisé par un soulèvement et quatre dépressions. Ce paramètre a bloqué la circulation de l'eau, entraînant la rétention de l'eau et la formation d'un environnement marin restreint fermé, ce qui était l'un des principaux facteurs contrôlant le dépôt de schiste WFF riche en matières organiques.
6. Avec l'avènement de l'ère géologique du Big Data, l'application de la technologie SIG peut être appliquée à presque tous les jeux de ressources avec des modèles de distribution spatiale dans le monde. Sur la base des données géoscientifiques et d'attributs d'entités, les résultats pourraient être obtenus efficacement et rapidement avec une méthode quantitative, présentant de larges perspectives d'application.

Le financement

Cette recherche est financée par le projet majeur de science et technologie nationale de Chine (projet n° 2017ZX05035-001).

Déclaration de disponibilité des données

Les données qui soutiennent les conclusions de cette étude sont disponibles auprès de l'auteur correspondant sur demande raisonnable.

Remerciements

Nous remercions LetPub (www.letpub.com) pour son assistance linguistique lors de la préparation de ce manuscrit.

Les références

- Algeo TJ, Lyons T. 2006. Covariation Mo-carbone organique total dans les environnements marins anoxiques modernes: Implications pour l'analyse des conditions paléorédoxes et paléohydrographiques. *Paleoceanography* 21: 279-298. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Chen Q. 2013. Etude quantitative sur la biodiversité et la paléogéographie des graptolites en Chine méridionale pendant la transition ordovicienne et silurienne. Nanjing: Université de l'Académie chinoise des sciences. [[Google Scholar](#)]
- Chen S, Lu X, Zhou C. 1999. Introduction aux systèmes d'information géographique. Presse scientifique. [[Google Scholar](#)]
- Chen X, Rong J, Zhou Z, Zhang Y, Zhan R, Liu J *et al.* 2001. Les soulèvements du Guizhou central et du Yichang, région du Haut Yangtze, entre l'Ordovicien et le Silurien. *Bulletin scientifique chinois* 46: 1052-1056. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Chen X, Rong J, Li Y, Boucot AJ. 2004. Modèles de faciès et géographie de la région du Yangtze, Chine méridionale, à travers la transition ordovicienne et silurienne. *Paléogéographie, paléoclimatologie, paléoécologie* 204: 353-372. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Chen X, Fan JX, Zhang YD. 2015. Subdivision et délimitation des schistes noirs de Wufeng et de Lungmachi dans les zones souterraines de la plate-forme du Yangtsé. *Journal of Stratigraphy* 39: 351-358. [[Google Scholar](#)]
- Chen X, Fan J, Wang W. 2017. Schéma de distribution progressif par étapes des schistes graptolitiques noirs longmaxi du Guizhou à Chongqing, Chine centrale. *Science China Earth Sciences* 47: 1133-1146. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Deng Q. 2013. La recherche sur les caractéristiques paléogéographiques des lithofaciès et le potentiel des ressources en gaz de schiste de la série du bas cambrien dans la région du Yangtsé supérieur. Wuhan: Université du Yangtze. [[Google Scholar](#)]
- Fan J, Hou X, Chen Z. 2013. Base de données sur la géobiodiversité et son application dans la recherche stratigraphique. *Journal of Stratigraphy* 37: 400-409. [[Google Scholar](#)]
- Fan J, Chen Q, Sun D. 2016. Création d'une carte paléogéographique haute résolution basée sur la base de données gbdb et la technique gis. *Journal of Paleogeography* 18: 115-125. [[Google Scholar](#)]
- Feng Z, Peng Y, Zhen K, Bao Z. 2001. Lithofaciès et paléographie de l'Ordovicien moyen et tardif en Chine du Sud. *Journal of Paleogeography* 3: 96-99. [[Google Scholar](#)]
- Ge X. 2013. Caractéristiques de l'évolution sédimentaire de l'Ordovicien dans la province du Hunan. *Géologie en Chine* 40: 1829-1841. [[Google Scholar](#)]
- Hammes U, Hamlin HS, Ewing TE. 2011. Analyse géologique des schistes de Haynesville du Jurassique supérieur dans l'est du Texas et l'ouest de la Louisiane. *Bulletin AAPG* 95: 1643-1666. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Han X, Qian R, Su B. 2011. Méthode d'échange de données pour l'interaction fluide-structure basée sur un algorithme d'interpolation adoptant une fonction radiale supportée de manière compacte. *Journal de l'Université de Tongji (sciences naturelles)* 39: 48-51. [[Google Scholar](#)]
- Liang F, Bai W, Zou C, Wang H, Wu J, Ma C *et al.* 2016. Schéma d'enrichissement en gaz de schiste et importance de l'exploration du puits Wuxi-2 dans le nord-est de Chongqing, bassin du Ne Sichuan. *Exploration et développement pétroliers* 43: 386-394. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]

- Mou C, Ge X, Xu X, Liang W. 2014. Lithofaciès et paléogéographie de l'Ordovicien supérieur et son importance géologique pétrolière dans la région du Moyen-Haut Yangtze. *Journal of Palaeogeography* 16: 427-440. [[Google Scholar](#)]
- Mu E. 1954. Sur le schiste de Wufeng. *Acta Palaeontologica Sinica* 2: 153-170. [[Google Scholar](#)]
- Nie H, Jin Z, Ma X, Liu Z, Lin T, Yang Z. 2017. Zone de graptolites et caractéristiques sédimentaires de la formation de Wufeng de l'Ordovicien supérieur - Formation de Longmaxi du Silurien inférieur dans le bassin du Sichuan et ses zones adjacentes. *Acta Petrolei Sinica* 38: 160-174. [[Google Scholar](#)]
- Rong J, Chen X. 1987. Différenciation faunique et changements de faciès de l'Ordovicien supérieur dans le sud de la Chine. *Acta Palaeontologica Polonica* 26. [[Google Scholar](#)]
- Rong J, Chen X, Wang Y, Zhan R, Liu J, Huang B *et al.* 2011. Expansion vers le nord du centre du Guizhou Oldland à travers la transition de l'Ordovicien et du Silurien: preuves et implications. *Scientia Sinica Terrae* 41: 1407-1415. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Sun H. 1990. Géostatistique et son application. Xuzhou: Presse de l'Université chinoise des mines et de la technologie. [[Google Scholar](#)]
- Tang P. 2017. Sur la formation de l'Ordovicien supérieur Daduhe de la région du Yangtsé supérieur. *Journal of Stratigraphy* 41: 119-133. [[Google Scholar](#)]
- Tobler WR. 1970. Un film informatique simulant la croissance urbaine dans la région de Detroit. *Géographie économique* 46: 234-240. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Tsung CK. 1999. Introduction aux systèmes d'information géographique. Pékin: Science Press. [[Google Scholar](#)]
- Wang Y, Dong D, Huang J, Li X, Wang S. 2016. Lithofaciès membres de Guanyinqiao de la formation de l'Ordovicien supérieur de Wufeng autour du bassin du Sichuan et importance pour les zones de gaz de schiste, dans le sud de la Chine. *Exploration et développement pétroliers* 43: 45-53. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Yang R, He S, Yi J, Hu Q. 2016. Structure des pores à l'échelle nanométrique et dimension fractale du schiste Wufeng-Longmaxi riche en matières organiques de la région de Jiaoshiba, bassin du Sichuan: enquêtes utilisant Fe-Sem, adsorption de gaz et pycnométrie à l'hélium. *Géologie marine et pétrolière* 70: 27-45. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Zhang G, Guo A, Wang Y. 2013. Tectonique du continent sud de la Chine et ses implications. *Scientia Sinica Terrae* 43: 1553-1582. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Zhang L, Fan J, Chen Q. 2014a. Distribution géographique et reconstruction paléogéographique du lit de Kuanqinchiao de l'Ordovicien supérieur dans le sud de la Chine. *Bulletin scientifique chinois (version chinoise)* 61: 2053-2063. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Zhang L, Fan J, Chen Q. 2014b. Reconstruction de la paléotopographie mi-hirnantienne dans la région du Yangtsé supérieur, Chine méridionale [J]. *Journal estonien des sciences de la terre* 63: 329-334. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Zhang L, Fan J, Chen Q. 2016. Distribution géographique et reconstruction paléogéographique du lit de Kuanqinchiao de l'Ordovicien supérieur dans le sud de la Chine (en chinois). *Bulletin scientifique chinois* 61: 2053-2063. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- Zou C, Dong D, Wang Y, Li X, Huang J, Wang S, *et al.* 2015. Le gaz de schiste en Chine: caractéristiques, défis et perspectives (I). *Exploration et développement pétroliers* 42: 689-701. [[Google Scholar](#)]
- Zou C, Dong D, Wang Y, Li X, Huang J, Wang S, *et al.* 2016. Le gaz de schiste en Chine: caractéristiques, défis et perspectives (II). *Exploration et développement pétroliers* 43: 182-196. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]

Citez cet article comme suit : Sun S, Zhang L, Wang H, Dong D, Zhang R. 2020. Une nouvelle méthode pour prédire la distribution de schiste de la formation de Wufeng dans la région du Yangtsé supérieur, Chine, *BSGF - Earth Sciences Bulletin* 191: 8 .

Tous les tableaux

Tableau 1 Nombre de sections utilisées dans la reconstruction de la Formation de Wufeng et des formations synchrones avec différents lithofaciès.

[↑ Dans le texte](#)

Tableau 2 Statistiques des trois méthodes d'interpolation.

[↑ Dans le texte](#)

Tableau 3 Programme pour déduire la profondeur de l'eau paléo en se basant sur la lithologie, la structure et les organismes bentoniques (*Zhang et al. , 2014a ,b*).

[↑ Dans le texte](#)

Tous les chiffres

Fig. 1



Division et corrélation des strates de l'Ordovicien dans la région du Yangtsé supérieur (*Zhang et coll. , 2014a*). (A) la vaste zone de la région du Yangtsé supérieur contenant le schiste noir typique de la formation de Wufeng; (B) la zone s'étendant du nord du Sichuan au sud du Shanxi; (C) la zone s'étendant du sud-est du Sichuan au nord-est du Yunnan; (D) la zone s'étendant du sud-ouest du Hunan au nord-est du Guangxi.

[↑ Dans le texte](#)

Fig. 2



Distribution géographique des points de coupe du schiste de la Formation de Wufeng et des strates synchrones dans la région du Yangtsé supérieur (Les cercles jaunes représentent la Formation de Wufeng et les points des strates synchrones; les croix orange représentent les sections qui ne contiennent pas ces formations; la ligne brune décrit le bassin du Sichuan et la ligne rouge décrit la région du Yangtsé).

[↑ Dans le texte](#)

Fig. 3



Répartition géographique de la formation de Wufeng et des formations synchrones avec différents lithofaciès dans la région du Yangtsé moyen-supérieur.

[↑ Dans le texte](#)

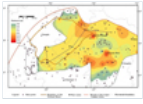
Fig. 4



Position des points d'épaisseur des sections de la Formation de Wufeng dans la région du Yangtsé moyen-supérieur.

[↑ Dans le texte](#)

Fig. 5



Carte d'interpolation 2D de la Formation de Wufeng dans la région du Yangtsé moyen-supérieur réalisée à l'aide de la méthode IDW.

[↑ Dans le texte](#)

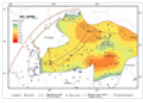


Fig. 6

Carte d'interpolation 2D de la Formation de Wufeng dans la région du Yangtsé moyen-supérieur réalisée à l'aide de la méthode de Kriging.

[↑ Dans le texte](#)

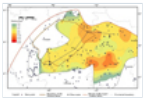


Fig. 7

Interpolation cartographique 2D de la Formation de Wufeng dans la région du Yangtsé moyen-supérieur réalisée à l'aide de la méthode RBF.

[↑ Dans le texte](#)



Fig. 8

Corrélation croisée de la formation de Wufeng dans la région du Yangtsé supérieur à travers les puits W202-N203-JY1-WX2-J101.

[↑ Dans le texte](#)



Fig. 9

Corrélation de l'interface latérale de la Formation de Wufeng dans la région du Yangtsé supérieur pour les 3 méthodes d'interpolation.

[↑ Dans le texte](#)

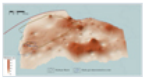


Fig. 10

Carte 3D montrant l'épaisseur dans la région du Yangtsé supérieur dérivée de la méthode IDW.

[↑ Dans le texte](#)

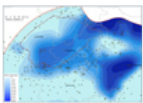


Fig. 11

Paléo-topographie 2D restaurée du Moyen Hirnantian-Late Katian dans la région du Yangtsé supérieur.

[↑ Dans le texte](#)

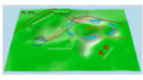


Fig. 12

Paléo-topographie 3D restaurée du moyen Hirnantian-Late Katian dans la région du Yangtsé supérieur.

[↑ Dans le texte](#)

