

ÉCOLE DOCTORALE
ENERGIE, MATERIAUX, SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS
Institut des Sciences de la Terre d'Orléans

THÈSE présentée par :
Thomas POITRENAUD

Soutenue le : **16 mai 2018**
pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université d'Orléans**
Discipline/ Spécialité : Sciences de la Terre / Métallogénie

**Le gisement périgranitique à tungstène et or de Salau (Pyrénées, France),
histoire polyphasée d'un système minéralisé tardi-varisque**

THÈSE dirigée par :

Eric MARCOUX

Professeur, Université d'Orléans

Philippe d'ARCO

Professeur, Université de Paris VI

RAPPORTEURS :

Kalin KOUZMANOV

Professeur, Université de Genève

Didier BEZIAT

Professeur, Université de Toulouse

JURY :

Kalin KOUZMANOV

Professeur, Université de Genève (*rapporteur*)

Didier BEZIAT

Professeur, Université de Toulouse (*rapporteur*)

Albert SOLER i GIL

Professeur, Université de Barcelone (*examineur*)

Michel FAURE

Professeur, Université d'Orléans (*examineur*)

Eric MARCOUX

Professeur, Université d'Orléans (*directeur de thèse*)

Philippe d'ARCO

Professeur, Université de Paris VI (*co-directeur de thèse*)

Michel BONNEMAISON

Docteur d'état, e-Mines (*invité*)

Colette DERRE

Maitre de conférences (ER), Université de Paris VI (*invité*)

Thomas POITRENAUD

**Le gisement périgranitique à W-Au de Salau (Pyrénées, France),
histoire polyphasée d'un système minéralisé tardi-varisque**

Résumé :

La chaîne varisque ouest-européenne est une vaste province métallogénique qui abrite une large diversité de minéralisations. Une grande partie d'entre elles ont fait l'objet d'exploitations historiques, à l'instar de Salau (Pyrénées Centrales), le plus important gisement de tungstène français. Les résultats de terrain combinés aux études minéralogiques et géochimiques convergent pour montrer qu'il existe deux types de minéralisations superposées : (1) un skarn à silicates calciques, rare scheelite fine et sulfures disséminés ; (2) une brèche filonienne à sulfures massifs (pyrrhotite et chalcopryrite dominante), or et abondante scheelite grossière qui a constitué l'essentiel du minerai exploité. Cette brèche se localise dans des zones de cisaillement ductile-fragile (faille Véronique) recoupant la granodiorite. Les datations U/Pb sur zircon, apatite et scheelite situent le skarn contemporain de l'intrusion de la Fourque à 295 ± 2 Ma alors que la brèche à sulfures massifs se forme environ 6 Ma après, à 289 ± 2 Ma. Ces minéralisations, issues de deux intrusions successives (granodiorite puis leucogranite), s'inscrivent dans l'évolution d'un modèle *Intrusion Related Deposit*. La mise en place de la brèche à forte teneur en or-scheelite est initiée par la focalisation progressive de la déformation régionale dans la Zone axiale des Pyrénées au sein de failles E-W dextres inverses. L'origine de l'or à l'échelle des Pyrénées pourrait s'expliquer en partie par une large répartition de ces minéralisations à forte teneur. La carte de paléo-températures RSCM a permis de localiser d'autres intrusions non affleurantes en étendant le district minéralisé sur plus de 7 km jusqu'à l'indice à W-Au d'Aurenère en Espagne.

Mots clés : Salau, Varisque, Zone Axiale, Pyrénées, scheelite, tungstène, or, datation, LA ICPMS, RSCM.

**The Salau W-Au intrusion-related ore deposit (Pyrenees, France),
multi-stage story of a late-variscan mineralized system**

Abstract:

The Western European variscan belt is a vast metallogenic district which hosts a wide diversity of mineralizations. A large part of them have been historically exploited, such as Salau (Central Pyrenees), the most important French tungsten deposit. The field results combined with the mineralogical and geochemical studies converge to show that it exists two superimposed ore types: (1) a calcic silicates skarn with rare fine-grained scheelite and disseminated sulphides; (2) a mineralized breccia with massive sulphides (pyrrhotite and chalcopryrite dominant), gold and abundant coarse-grained scheelite which have constituted the main part of the exploited ore. This breccia is localized in ductile-fragile shear-zones (Veronique fault) which crosscut the granodiorite. U/Pb datings on zircon, apatite and scheelite place the skarn, contemporaneous of the La Fourque intrusion at 295 ± 2 Ma while the massive sulphides breccia was formed ca. 6 Ma later at 289 ± 2 Ma. These mineralizations, from two successive intrusions (granodiorite then leucogranite), belong to the evolution of an *Intrusion Related Deposit* model. The emplacement of the high grade gold and scheelite breccia was initiated by the progressive focalization of the regional deformation in the Axial Zone of the Pyrenees within E-W dextral-reverse faults. The source of gold at the Pyrenees scale could be explained in part by this type of high-grade mineralizations. The RSCM paleo-temperature map has made possible to locate other undercover intrusions, extending the mineralized district over more than 7 km until the W-Au Aurenere occurrence in Spain.

Keywords: Salau, Variscan, Axial Zone, Pyrenees, scheelite, tungsten, gold, dating, LA ICPMS, RSCM.



Institut des Sciences de la Terre d'Orléans
Campus Géosciences
1A, rue de la Férollerie
45071 Orléans Cedex 2



**Le gisement périgranitique à tungstène et or de Salau (Pyrénées, France),
histoire polyphasée d'un système minéralisé tardi-varisque**



Le gisement à tungstène et or de Salau vu depuis l'est du massif de La Fourque

Manuscrit de thèse

Thomas POITRENAUD

Défendue le : *16 mai 2018*

Thèse dirigée par :

Eric MARCOUX

Professeur, Université d'Orléans

Philippe d'ARCO

Professeur, Université Pierre et Marie Curie

Co-encadrement :

Michel BONNEMAISON

Docteur d'état, e-Mines

Colette DERRE

Professeur, Université Pierre et Marie Curie

Romain AUGIER

Maitre de conférences, Université d'Orléans

Contexte de réalisation de la thèse et financement

Depuis une dizaine d'années, plusieurs communautés et pays (Union Européenne, USA, Australie, Canada...) ont pleinement subi la crise mondiale sur les métaux rares ([Jégourel, 2011](#)). Cette dernière a entraîné une prise de conscience par ces états de leur dépendance vis-à-vis de la Chine qui détient le monopole sur une grande partie de ces métaux (tungstène, antimoine, terres rares...). Dans ce contexte extrêmement tendu en termes d'approvisionnement, l'Union Européenne a décidé de réagir en établissant une liste de « métaux stratégiques et/ou critiques » indispensables pour le bon fonctionnement des ses industries (aéronautique, automobile, high tech...). Cette liste avait pour but de mettre en place une politique de sécurisation des sources d'approvisionnement pour ces substances, en se positionnant vers des pays miniers concurrentiels de la Chine sur les ressources qu'elles ne possède pas sur son territoire et en relançant l'exploration / exploitation minière sur le territoire de l'Union Européenne.

Ainsi, même si, en 2016, l'Europe était le troisième producteur mondial de matières premières minérales derrière l'Amérique du Nord et l'Asie, sa dépendance en métaux n'a jamais été aussi importante et cruciale. Sa production a chuté drastiquement et est passé de 50 % de la production mondiale au milieu du XIXème siècle, à moins de 5 % en 2009 ([Marcoux, 2017](#)). Même si, la part du recyclage et de l'économie circulaire en général, progresse, elle demeure faible et le recours à l'extraction minière est une nécessité ([Labbé, 2016](#)).

C'est ainsi qu'au début des années 2010, sous l'impulsion de A. Montebourg, alors ministre du redressement productif, la France, au même titre que ses voisins, recommença à s'intéresser au potentiel minier du territoire métropolitain. Le BRGM, Service Géologique National français, fut alors chargé de réévaluer le potentiel minier de la France (*figure 1* ; [Cassard et al., 2012](#) ; [Audion, 2013](#) ; [Bertrand et al., 2013](#) ; [Gloaguen & Tourlière, 2016](#) ; [Melleton et al., 2016](#)).

Au cours de cette même période, cette réactualisation du potentiel minier français, a suscité l'intérêt de plusieurs juniors d'exploration (Variscan Mines, Scotgold, Cordier Mines, Garrot-Chaillac, Cominor, SudMine) et même de sociétés plus importantes (Imerys). Elles ont alors déposé des permis exclusif de recherche de mines (PERM) pour les métaux précieux (Au-Ag), les métaux de base (Cu, Pb, Zn), les métaux stratégiques (Sn, W, Sb, F) et leurs potentiels sous-produits valorisables (In, Ge, Ga, Nb, Ta, Li...); ainsi qu'un permis d'exploitation (PEX) à Echassières.

Le potentiel français pour le tungstène est très élevé, et l'ancien gisement de Salau en constitue l'une des plus importantes ressource du territoire. Rouvrir la mine de Salau permettrait ainsi à la France d'être moins dépendante, voire quasi-autonome, vis-à-vis des importations chinoises pour ce métal, réduisant ainsi son empreinte carbone et contribuant à la lutte contre le réchauffement climatique. Ce site présente un triple intérêt : 1- stratégique pour l'industrie française, 2- environnemental et 3- métallogénique qui constitue le cœur de cette thèse.

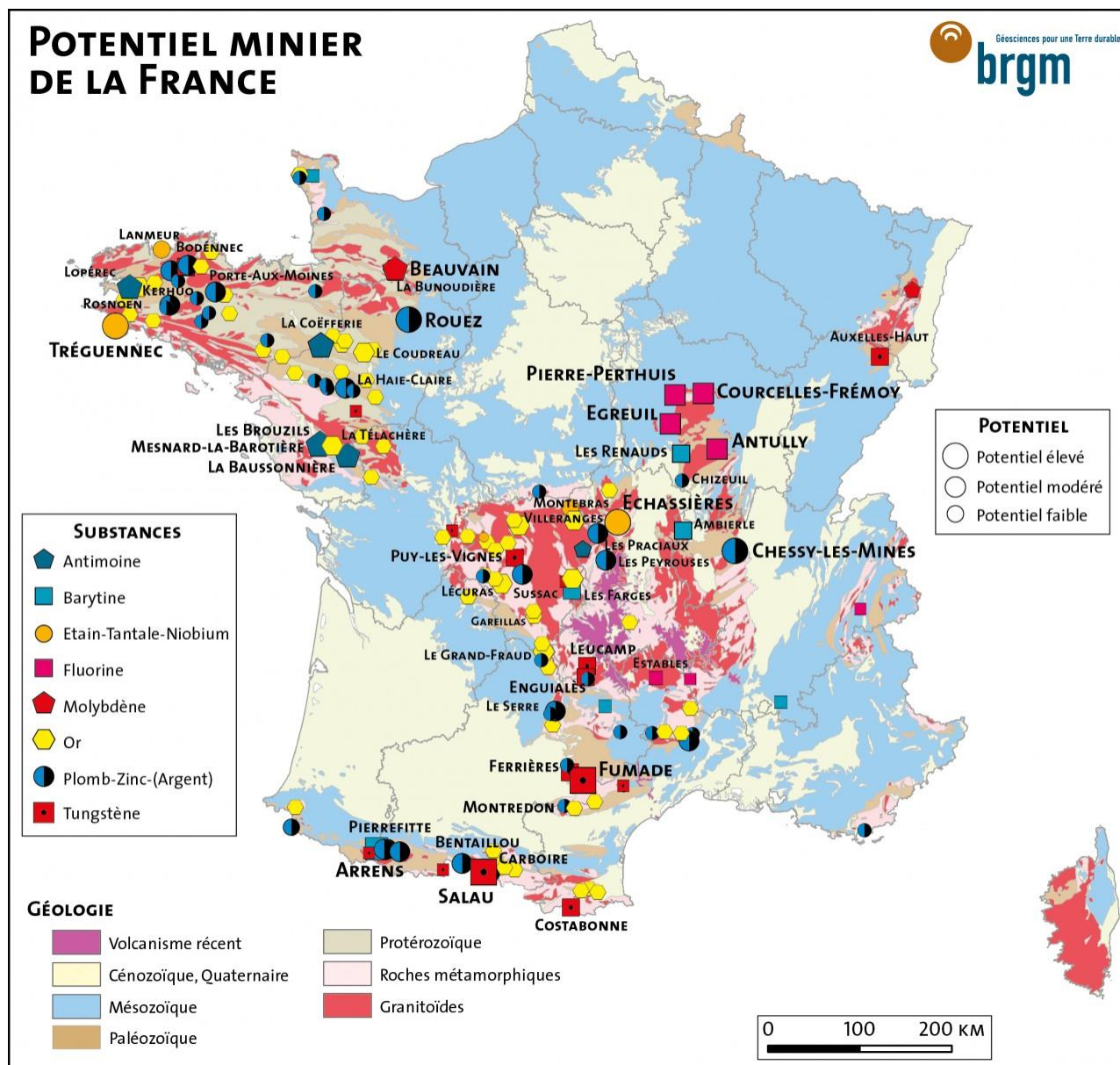


Figure 1 : Carte du potentiel minier en France métropolitaine (BRGM, 2017)

Cette thèse s'inscrit dans la politique de Recherche & Développement de l'entreprise de services à l'exploration minière e-Mines. Elle est au cœur des problématiques d'approvisionnement en métaux critiques identifiés par l'Union Européenne (tungstène, antimoine, titane) et du renouveau minier français incarné par le lancement de nouveaux travaux d'exploration en France métropolitaine. Elle a été réalisée au sein de l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO) en collaboration avec l'université Pierre et Marie Curie (UPMC), à Paris, ayant effectuée une grande partie des études menées sur ce gisement dans les années 1970-1980.

La bourse de thèse ainsi que les frais de fonctionnement ont été intégralement financé par l'entreprise e-Mines sur un dispositif de collaboration CIFRE avec l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans.

Table des matières

| | |
|---|-------------------|
| <i>I. Introduction.....</i> | <i>19</i> |
| a. Le tungstène, un métal stratégique et critique pour l'industrie | 19 |
| i. Découverte..... | 19 |
| ii. Propriétés..... | 19 |
| iii. Usages..... | 21 |
| iv. Economie..... | 23 |
| v. Potentiel en France métropolitaine | 29 |
| b. Le modèle skarn | 32 |
| c. Problématique | 35 |
| <i>II. Contexte géologique</i> | <i>39</i> |
| a. L'orogénèse Varisque | 39 |
| i. Généralités..... | 39 |
| ii. Histoire géodynamique..... | 42 |
| iii. Minéralisations en W..... | 45 |
| b. La zone axiale des Pyrénées | 50 |
| i. Généralités..... | 50 |
| ii. Magmatisme tardi-varisque | 56 |
| iii. Modèle tectonique | 59 |
| iv. Minéralisations | 63 |
| c. Contexte géologique et métallogénique du secteur de Salau..... | 77 |
| i. Localisation | 77 |
| ii. Formations métasédimentaires | 79 |
| iii. Magmatisme | 88 |
| iv. Métamorphisme de contact..... | 93 |
| v. Déformation..... | 95 |
| vi. Minéralisations et contexte minier historique..... | 99 |
| <i>III. Etude des minerais à l'échelle des corps minéralisés.....</i> | <i>107</i> |
| a. Description des corps minéralisés et des différents indices..... | 107 |

| | | |
|------------|--|------------|
| i. | Le Bois d'Anglade et les skarns | 107 |
| ii. | Le quartier Véronique et les brèches filoniennes à sulfures massifs | 119 |
| iii. | Les indices du Ravin de la Fourque..... | 143 |
| iv. | Les indices de la périphérie du massif de la Fourque | 147 |
| v. | Espis | 158 |
| vi. | Le bois de la Péguille..... | 161 |
| vii. | Vallée de la Pallaresa / Aurenère..... | 162 |
| b. | Distribution du tungstène et de l'or dans les corps minéralisés | 166 |
| i. | Gisement de Salau | 166 |
| ii. | Indice d'Aurenère | 170 |
| c. | Synthèse des observations de terrain | 173 |
| IV. | Modélisation 3D | 177 |
| a. | Compilation et traitement des données historiques | 177 |
| i. | Recherche des données | 177 |
| ii. | Structure de la base de données de sondages..... | 179 |
| iii. | Saisie et harmonisation des données..... | 180 |
| b. | Modélisation 3D du gisement sous Micromine™..... | 182 |
| i. | Structure du système d'information géographique | 182 |
| ii. | Modélisation des infrastructures de la mine | 183 |
| iii. | Modélisation 3D des sondages historiques..... | 185 |
| iv. | Modélisation des principaux corps minéralisés | 186 |
| c. | Estimation de ressources | 190 |
| i. | Etude variographique..... | 190 |
| ii. | Création d'un modèle de blocs | 192 |
| iii. | Estimation des ressources potentielles et synthèse 3D du gisement..... | 199 |
| V. | Etude minéralogique, microchimique et isotopique | 205 |
| a. | Secteur de la mine d'Anglade | 205 |
| i. | L'auréole de métamorphisme externe et interne | 205 |
| ii. | Les exoskarns | 205 |
| iii. | Les endoskarns | 211 |

| | |
|---|------------|
| iv. La minéralisation à sulfures massifs et scheelite grossière..... | 211 |
| v. Assemblages particuliers ou tardifs..... | 226 |
| vi. Synthèse paragénétique | 228 |
| b. Aurenère | 230 |
| c. Données microsonde | 234 |
| i. Sulfures..... | 234 |
| ii. Phosphates et silicates | 242 |
| d. Isotopie | 249 |
| i. Géochimie isotopique du soufre | 249 |
| ii. Géochimie isotopique du plomb..... | 253 |
| <i>VI. Le caractere polyphasé du gisement tardi-varisque de salau (Pyrénées, France), mise en évidence par analyses de terres rares et par datations U/Pb en LA-ICP-MS</i> | 257 |
| a. Introduction..... | 261 |
| b. Geological background | 263 |
| i. <i>Regional geological context</i> | 263 |
| ii. <i>Local geological context</i> | 265 |
| c. Ore characterization | 271 |
| i. <i>Field observations</i> | 271 |
| ii. Parageneses and textures | 273 |
| iii. Cathodoluminescence imaging..... | 275 |
| d. REE geochemistry of scheelite and apatite..... | 277 |
| i. Method..... | 277 |
| ii. Results | 278 |
| e. LA-ICP-MS U-Pb dating of zircon, apatite and scheelite | 282 |
| i. <i>Materials and methods</i> | 282 |
| ii. Geochronological results | 283 |
| f. Discussion..... | 288 |
| i. Evidence for a polyphased emplacement of the Salau/Aurenere W/Au deposit | 288 |

| | |
|---|------------|
| ii. Clues for intrusion-related ore-deposits typical cooling time..... | 291 |
| iii. Ore-deposit model and regional implication | 293 |
| g. Concluding remarks | 295 |
| VII. La méthode RSCM en tant qu'outil thermométrique pour l'exploration minière..... | 311 |
| a. Introduction..... | 314 |
| b. Geological background | 316 |
| i. Regional context..... | 316 |
| ii. Local context | 317 |
| iii. Skarn description | 321 |
| c. RSCM geothermometer application..... | 325 |
| i. Methodology..... | 325 |
| ii. Analytical conditions..... | 326 |
| iii. Results | 327 |
| iv. Variography and kriging..... | 332 |
| d. Data inversion and COMSOL thermal model | 334 |
| i. Average thermal gradient | 334 |
| ii. Validation (field and magnetic survey) | 335 |
| iii. COMSOL model | 337 |
| e. Discussion..... | 339 |
| i. Choice of the calibration..... | 339 |
| ii. Conditions for applicability of the method to others intrusion-related deposits exploration | 339 |
| iii. Validation and interpretation of the intrusion roof depth map | 340 |
| iv. Implications for thermal structure of the Axial Zone | 340 |
| f. Conclusion..... | 341 |
| VIII. Discussion / Synthèse..... | 347 |
| a. Histoire polyphasée et modèle métallogénique du gisement de Salau..... | 347 |
| i. Observations et résultats de terrain..... | 347 |
| ii. Observations et résultats de laboratoire..... | 351 |

| | |
|--|-------------------|
| iii. Genèse du gisement..... | 352 |
| iv. Modèle métallogénique | 355 |
| v. Métallotectes et exploration minière | 361 |
| b. Evolution de la nature du magmatisme tardi-Varisque et implications pour la métallogénie du tungstène et de l’or dans les Pyrénées | 363 |
| i. Un magmatisme polyphasé..... | 363 |
| ii. Le tungstène dans la chaîne varisque..... | 369 |
| c. Durée de vie des systèmes magmatiques et hydrothermaux | 372 |
| <i>IX. Conclusion générale.....</i> | <i>377</i> |
| <i>GLOSSAIRE.....</i> | <i>379</i> |
| <i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</i> | <i>383</i> |
| <i>LISTE DES FIGURES</i> | <i>427</i> |
| <i>LISTE DES TABLEAUX.....</i> | <i>443</i> |
| <i>LISTE DES PHOTOGRAPHIES.....</i> | <i>447</i> |
| <i>ANNEXES</i> | <i>455</i> |
| a. Annexe 1 – Analyses or historiques du gisement de Salau (BRGM, 1986)..... | 457 |
| b. Annexe 2 – Corrélation entre données pXRF et ICP pour le tungstène | 461 |
| c. Annexe 3 - Aperçu des logs de sondages historiques intégrés dans le modèle 3D..... | 463 |
| d. Annexe 4 - Aperçu des plans miniers récupérés et intégrés dans le modèle 3D..... | 467 |
| e. Annexe 5 - Tableaux d’analyses microsonde..... | 471 |
| f. Annexe 6 – Cartes de localisation des échantillons prélevés | 481 |
| g. Annexe 7 – Cartographie magnétique..... | 485 |

Chapitre IV

MODELISATION 3D

IV. Modélisation 3D

Les données historiques montrent que le skarn à silicates calciques et scheelite fine disséminée relativement pauvre en tungstène (0,2 à 0,5 % WO_3) n'était pas la cible des travaux d'exploitation historique (Derré *et al.*, 1980 ; Fonteilles *et al.*, 1989). En reconsidérant cette minéralisation sur les paramètres technico-économiques actuels, elle pourrait potentiellement constituer un minerai intéressant pour une future exploitation. En plus de permettre de comprendre la géométrie à l'échelle du gisement entre le skarn et les sulfures massifs, la modélisation 3D réalisée dans le chapitre suivant, propose une estimation volumique des corps minéralisés. Son objectif principal est de mieux contraindre les relations géométriques des différents corps minéralisés, de mettre en évidence leurs potentielles extensions et de donner une estimation sur les ressources potentielles du gisement. Pour réaliser ce travail, le logiciel de modélisation 3D Micromine™ 2014 a été utilisé. Une partie de ce travail a été réalisée en partenariat avec l'agence CSA Global de Horsham (UK).

a. Compilation et traitement des données historiques

i. Recherche des données

Durant les phases d'exploration puis d'exploitation du gisement de Salau, de nombreux sondages carottés et percutants furent réalisés. Ils avaient pour but de rechercher de nouveaux corps minéralisés et le cas échéant, d'accroître les ressources/réserves du gisement.

Le gisement de Salau a été exploré à la fois par le BRGM et la Société Minière d'Anglade. Les premiers programmes de recherches ont débuté en 1961. Tout d'abord, la cartographie géologique a été réalisée à différentes échelles (du 1/50 000 jusqu'au 1/2 000). Ensuite, les zones minéralisées identifiées depuis la surface topographique ont été forées par 17 sondages en 1963 depuis la galerie d'exploration 1430 creusée à cette occasion. Ces campagnes de forages et celles qui suivirent jusqu'en 1967 ont été uniquement réalisées sur la zone du Bois d'Anglade qui était la plus accessible.

En 1970, la SMA prit la décision d'entrer en exploitation et ce fut elle qui poursuivit les travaux de recherches (sondages, galeries, géophysique...) initiés par le BRGM. De nombreuses campagnes de sondages furent réalisées jusqu'en 1986, année de fermeture de la mine suite à la chute des cours du tungstène. Il existait deux lots d'archives correspondant à ces données. La version originale entreposée dans les bureaux de la SMA à Salau fut stockée durant une longue période dans un local de St Girons avant d'être rapatriée dans les années 2000 au BRGM Toulouse puis au BRGM d'Orléans, où elle réside actuellement. Une copie de ces originaux avait été conservée par un salarié de la SMA, ainsi qu'une petite partie par l'Université Pierre et Marie Curie.

La description des logs de sondages récupérés (carottés et destructifs) proviennent de rapports publics BRGM (Guiraudie *et al.*, 1964 ; Passaqui *et al.*, 1965 ; Prouhet *et al.*, 1966 ; Michard *et al.*, 1986), de la base de données BSS (Banque du Sous-Sol) visualisable sous Infoterre [1] et de la copie des archives de la SMA.

En totalité, 677 logs de sondages carottés, 14 logs de sondages destructifs et 141 sondages par air-blast provenant du BRGM et de la SMA ont pu être recueillis. En plus de ces sondages, des données de 2373 rainurages réalisées le long des fronts de taille ont été numérisées. La longueur des sondages carottés varie de 25 à 492 m et certains ont été forés verticalement vers le haut, aux toits de certaines galeries. La *figure 114* montre leur localisation sur le modèle 3D du massif de la Fourque. La plupart de ceux réalisés par le BRGM sont concentrés sur la zone du Bois d'Anglade, à l'inverse de ceux réalisés par la SMA qui concernent l'ensemble du gisement en souterrain et la périphérie du massif en surface. Plus de 500 sondages concernent le corps minéralisé Véronique. Les 54 derniers sondages réalisés sur l'aval pendage de la lentille Véronique depuis les niveaux 1230 et 1165 ont également pu être récupérés et numérisés. La plupart des données d'analyses concernent le tungstène (exprimé en % WO₃). Seulement une centaine d'analyses, récupérées dans un rapport de 1986, concernent l'or et l'argent (*figure 107 et annexe 1*).

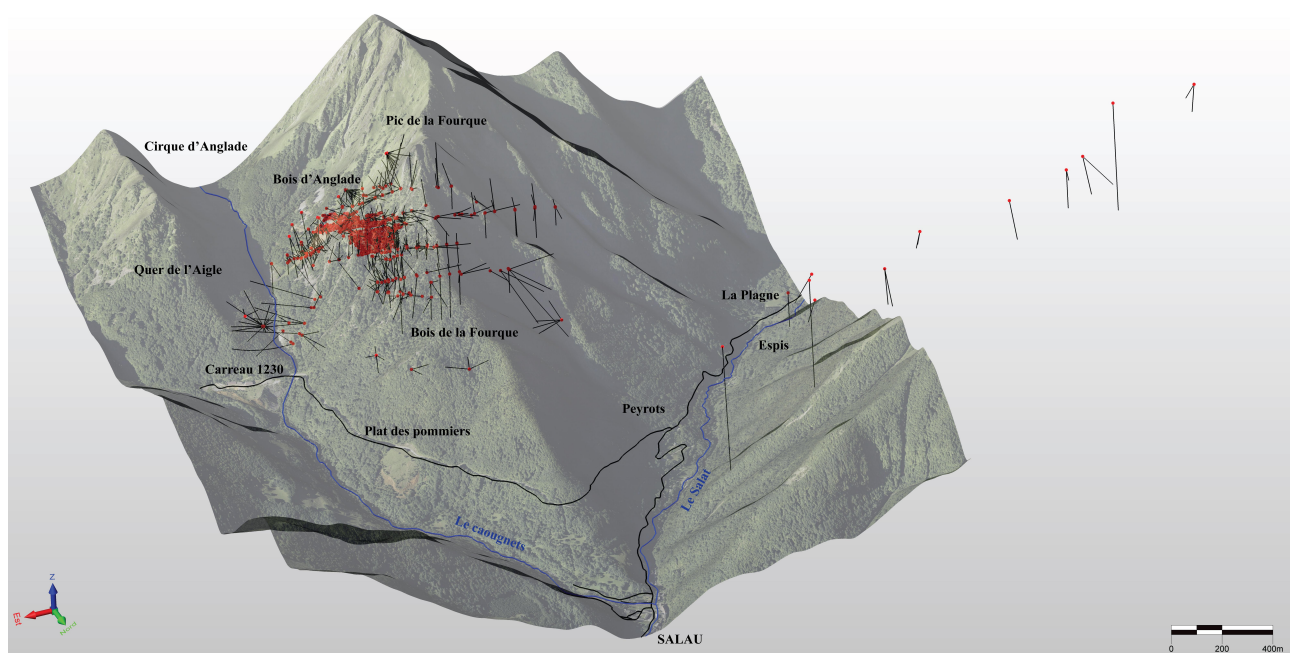


Figure 114 : Localisation des 832 sondages et des 2373 rainurages traités sur la surface topographique du modèle 3D

ii. Structure de la base de données de sondages

Pour convertir les données manuscrites historiques en données numériques exploitables sous SIG et logiciel 3D, il a fallu structurer une base de données de sondages. La saisie a été réalisée sous le logiciel Microsoft Excel® avant d'être importée sous Micromine™ pour être mise en forme et contrôlée. Il a été décidé d'utiliser des tables thématiques classiquement utilisées dans les logiciels de modélisation 3D. La base de données créée repose sur 5 tables (*figure 115*) :

- Table « Collar » : table de référence pour identifier et localiser (X, Y, Z) chaque sondage de manière unique. La longueur du sondage est précisée dans cette table ;
- Table « Survey » : table donnant les caractéristiques d'orientation (azimuth, inclinaison...) et de déviation de chaque sondage ;
- Table « Lithology » : table détaillant les passes lithologiques identifiées sur chaque sondage par le géologue ;
- Table « Assays » : table détaillant les passes analysées notamment pour le WO₃ sur chaque sondage ;
- Table « Minerals » : table détaillant l'abondance de différents minéraux indicateurs (grenat, pyroxène, vésuvianite, pyrrhotite, chalcopryrite) décrits de manière qualitative dans les passes de sondages ;

Chaque sondage est identifié de manière unique (clé primaire) par son nom (Hole_ID). Pour les analyses, chaque passe numérisée est distinguée par son numéro d'échantillon qui intègre le code Hole_ID du sondage correspondant avec un incrément numérique.

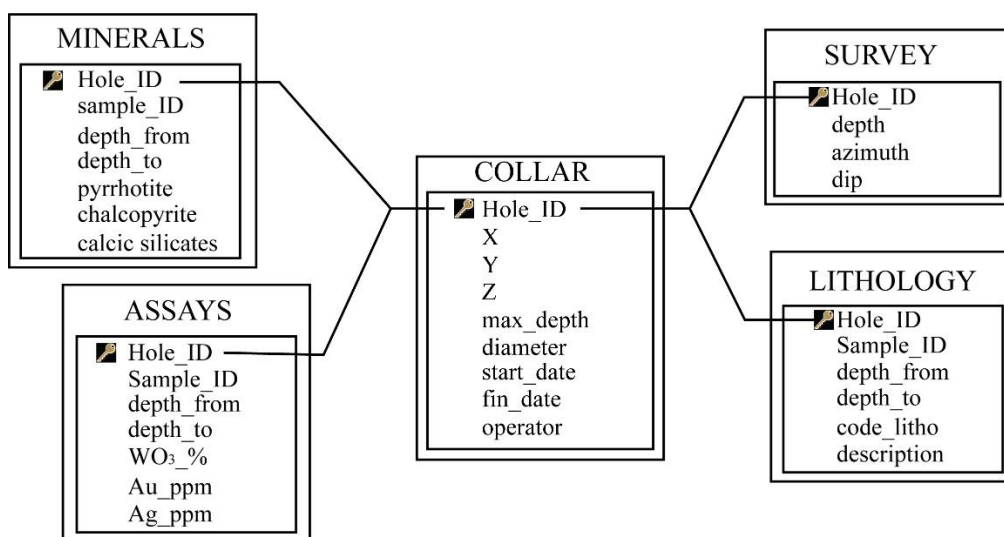


Figure 115 : Structure du modèle logique de données utilisé pour la base de données des sondages

iii. Saisie et harmonisation des données

La saisie des données a été réalisée sous Excel® avant d'effectuer leur mise en forme sous Micromine™. Cette étape a consisté à transférer les descriptions du log géologique pour chaque sondage dans la table « lithology » correspondante. Une grande hétérogénéité des descriptions est présente dans les sondages, notamment dans la nomenclature des roches magmatiques et du minéral. Cette dernière dépend de l'entreprise ayant réalisé le sondage, son auteur, l'année de sondage et du type de corps minéralisé recherché (*annexe 3*).

Au vu de l'hétérogénéité dans la description lithologique des sondages par les différents géologues, il a été nécessaire d'harmoniser ces dernières selon un code. Ce dernier permet de travailler avec un nombre de lithologies différentes corrélables en 3D. Il a été décidé d'utiliser les faciès lithologiques principaux pour réaliser l'harmonisation du log géologique (*tableau 4*).

| Codes lithologiques harmonisés | | |
|--------------------------------------|-----------------|--------------------|
| Nom | Sigle harmonisé | Couleur harmonisée |
| Aplite | Ap | |
| Diorite | GRD | |
| Granodiorite | | |
| Calcschiste (schiste bleuté) | Calcsh | |
| Calcaire (supérieur ou inférieur) | Calc | |
| Cornéenne calcique | CC | |
| Cornéenne schisto-feldspathique | CSF | |
| Skarn | SK | |
| Skarnoïde | | |
| Quartz | QZ | |
| Calcite | Ca | |
| Arsénopyrite | SULF | |
| Pyrrhotite massive | | |
| Formations superficielles (moraines) | FS | |
| Non renseigné | NR | |

Tableau 4 : Table des codes lithologiques harmonisés

Pour les analyses (*tableau 5*), le choix des seuils a été basé sur les valeurs du *cut off* et de la répartition des teneurs dans les différents corps minéralisés du gisement. La teneur de coupure étant de 0,3 % WO₃, cette valeur a été retenue pour définir le seuil inférieur. L'attribution de valeurs qualitatives aux valeurs quantitatives des analyses permet de mieux appréhender l'évolution des teneurs sur un sondage où toutes les passes minéralisées n'ont pas été analysées.

| Codes analyses harmonisées (sondages, plans miniers) | | |
|--|-------|-------------------------------|
| Nom qualitatif | Sigle | Teneur en WO ₃ (%) |
| Scheelite en traces | Tr | < 0,3 % |
| Scheelite peu abondante | PA | 0,3 < PA < 0,55 |
| Scheelite moyennement abondante | MA | 0,55 < MA < 0,8 |
| Scheelite abondante | A | 0,8 < A < 1,1 |
| Scheelite très abondante | TA | 1,1 < TA |

Tableau 5 : Table des codes analyses harmonisés

Les 832 sondages et 2373 rainurages ont été intégrés sous Micromine™ afin de visualiser les informations en 3 dimensions. L'intégrité de la base de données a été contrôlée grâce aux fonctionnalités internes du logiciel. Les valeurs des analyses s'étendent de 50 ppm à 50,44 % WO₃ pour une moyenne située autour de 1,73 % WO₃. La table des analyses dénombre 4920 passes de sondage et 2374 passes de rainurage analysés pour le tungstène ainsi que 63 passes de sondages analysées pour l'or et l'argent. L'histogramme de fréquence des valeurs en tungstène montre qu'il existe deux populations de valeurs en tungstène qui correspondent bien avec les différents types de minerai rencontrés sur le terrain (*figure 116*). Les skarns à silicates calciques et scheelite fine représentent la première famille à faible teneur en tungstène qui se concentre autour de 0,33 % WO₃. Les sulfures massifs à scheelite grossière abondante représentent la catégorie à forte teneurs en tungstène qui s'étale autour de 2,3 % WO₃.

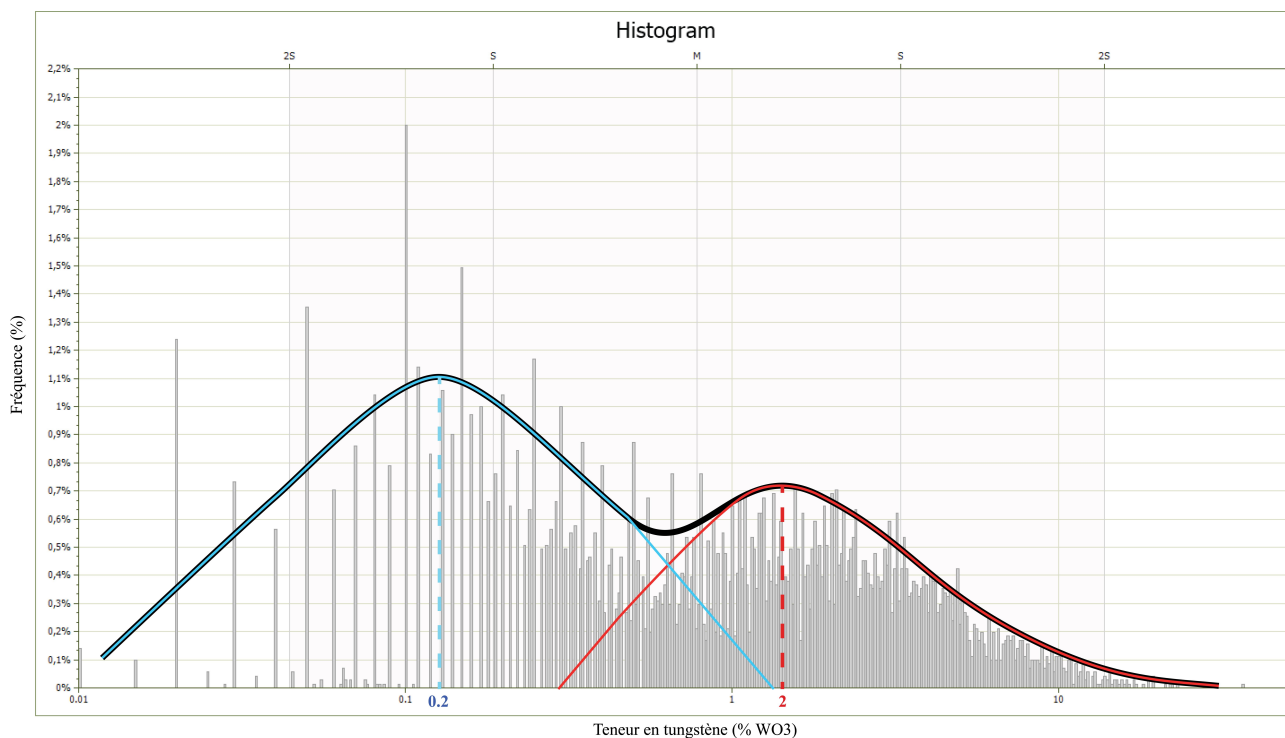


Figure 116 : Histogramme de la fréquence du nombre d'analyses en fonction de la teneur en tungstène obtenue dans les enregistrements de la table « Assays ». 2 populations de valeurs à faible et forte teneur en tungstène se démarquent.

b. Modélisation 3D du gisement sous Micromine™

i. Structure du système d'information géographique

Un Système d'Informations Géographiques (SIG) sous ArcView™ a été créé sur le gisement de Salau dans le but de réunir tous les travaux historiques pour les combiner et pouvoir les utiliser lors de la modélisation 3D (*figure 117*). Il utilise le système de projection de référence "Lambert 93". Il compile des informations :

- géographiques (cartes topographiques IGN au 1/25 000, MNT de détail à 10 m de résolution spatiale réalisé à partir de plans de géomètre, etc...) ;
- géologiques (cartes géologiques à grande échelle au 1/50 000 et de détail au 1/10 000 et 1/2 000 sur le secteur de Salau) ;
- structurales (axe des plis majeurs affectant la série sédimentaire, trajectoires des failles affectant le massif de granodiorite) ;
- sur les travaux d'exploration historiques réalisés sur le secteur : géochimie, géophysique (magnétisme, électromagnétisme, résistivité...), localisation des sondages, indices minéralisés de surface) ;
- sur les anciens travaux miniers : plans des galeries principales et des descenderies, positions des coupes sériées passant par les corps minéralisés...) ;

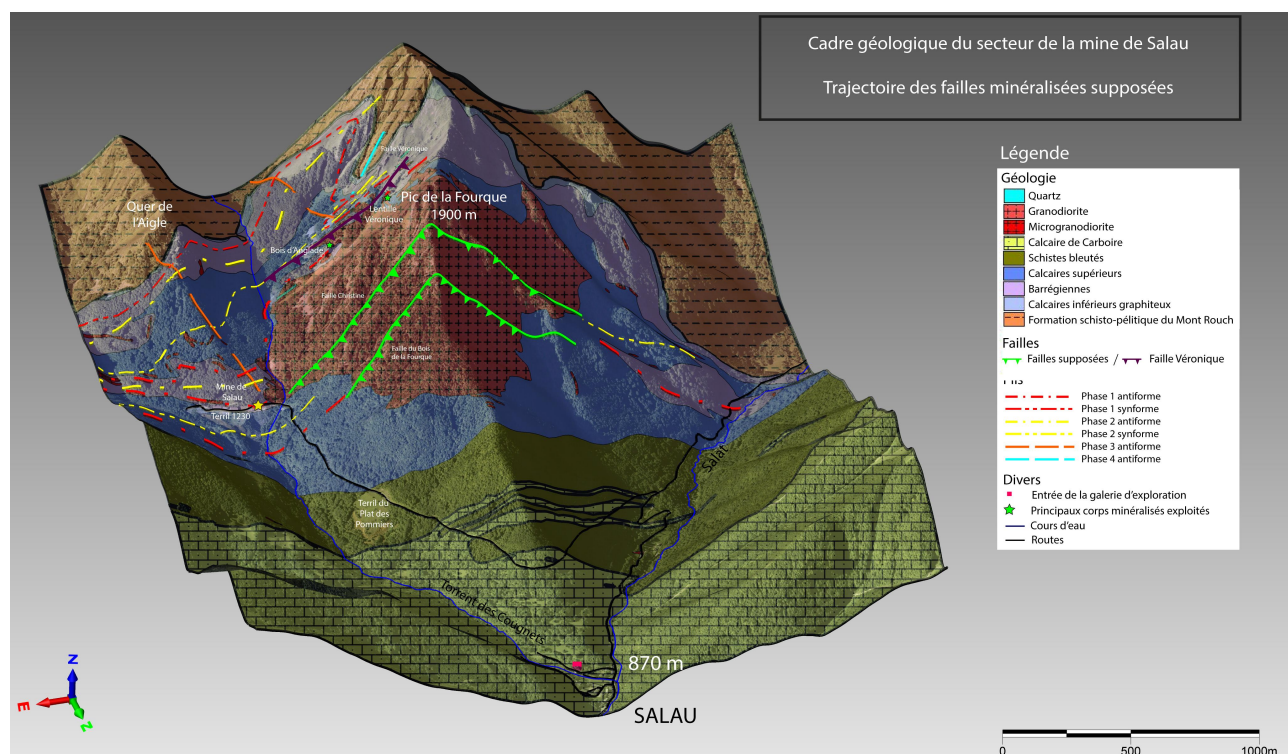


Figure 117 : Représentation 3D du cadre géologique et structural du secteur de Salau (Micromine™) à partir du système d'information géographique constitué sous ArcGis™.

ii. Modélisation des infrastructures de la mine

Les levés de galeries ont principalement été recueillis auprès des archives de la SMA. Ces derniers correspondent aux niveaux les plus importants de la mine donnés en mètres NGF (1165, 1230, 1320, 1430, 1452, 1475, 1530, 1575, 1620), aux sous-niveaux creusés dans le corps minéralisé du Bois d'Anglade et de Véronique (*annexe 4*). Ces plans au 1/250 étaient tenus à jour à chaque dépilage par le géologue de la mine et permettaient d'avoir une vue d'ensemble de la minéralisation. Le tracé des galeries était tenu à jour par un géomètre.

Le principe d'exploitation reposait sur celui des sous-niveaux par tranche montante. Ces derniers étaient tracés dans le minerai puis le stot résiduel entre deux sous-niveaux consécutifs était ensuite abattu (*figure 118*). Après chaque dépilage, la plupart des niveaux étaient remblayés avec les stériles d'exploitation provenant des travers bancs creusés dans la granodiorite ou l'encaissant carbonaté. Des descenderies assuraient la connexion entre les différents étages de la mine et permettaient aux chargeurs-transporteurs de circuler. Ces véhicules convoiaient le minerai vers les accumulateurs correspondant à de grandes cheminées inclinées qui le déversaient dans la galerie de roulage (1320 m). Depuis ce niveau, un locotracteur acheminait le minerai jusqu'au poste de concassage et broyage.

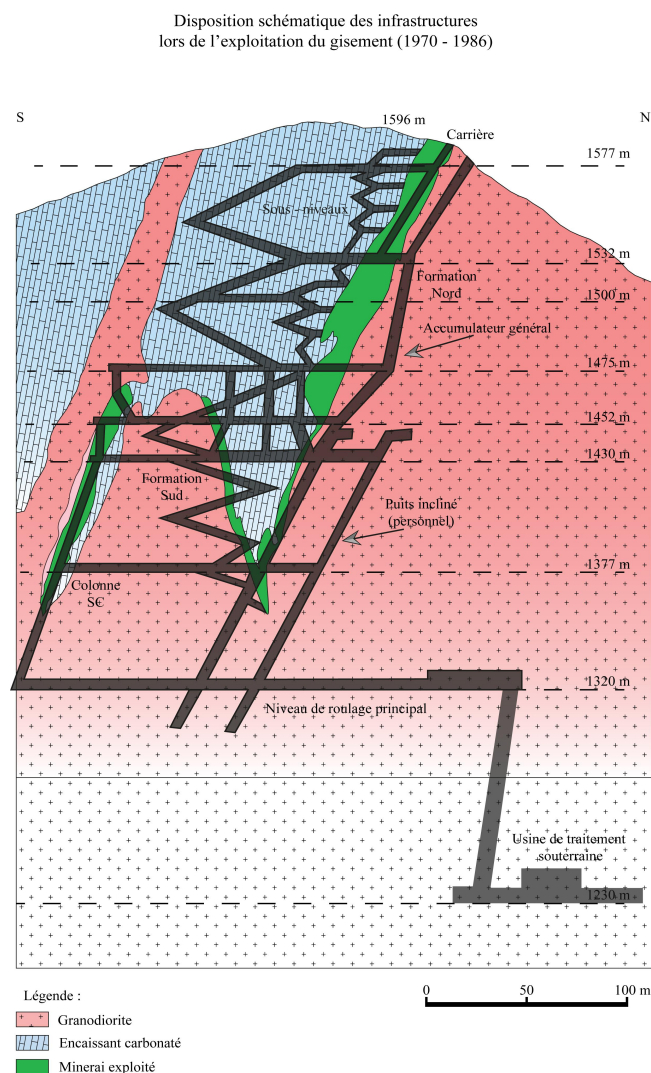


Figure 118 : Dispositif schématique des infrastructures lors de l'exploitation du gisement (1970 – 1986)

Les plans recueillis utilisent comme référence, le système de coordonnées projetées « Lambert Zone 3 ». Leur intégration dans la base de données SIG a nécessité leur conversion en « Lambert 93 ». Le tracé de chaque galerie a ensuite été digitalisé sur le logiciel ArcGIS™. La même méthodologie a été suivie pour les cheminées. Les fichiers digitalisés ont ensuite été importés sous Micromine™ pour être modélisés en 3D. Les tracés de chaque galerie ont été placés à leur côte correspondante. Le même procédé a été employé pour les cheminées.

Une interpolation entre les tracés de chaque niveau (toit et sole) a été réalisée pour en délimiter le volume en 3 dimensions. Les plans inclinés entre les différents niveaux ont été modélisés selon le même principe. La visualisation en 3 dimensions des infrastructures modélisées (*figure 119*) montre les principaux niveaux d'exploitation du gisement de Salau. Ces infrastructures ont permis en partie de guider la modélisation des minéralisations.

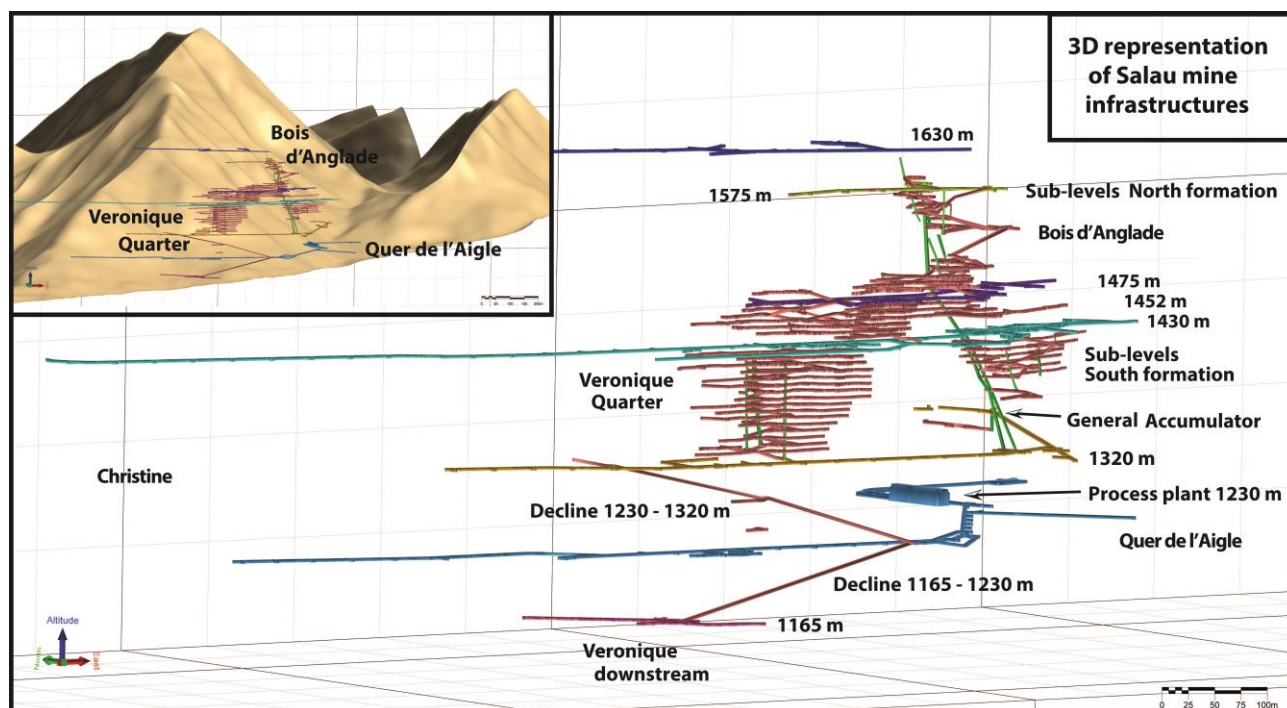


Figure 119 : Représentation 3D des infrastructures (galeries et cheminées) de la mine de Salau, vue vers le NE (Micromine™)

iii. Modélisation 3D des sondages historiques

La base de données de sondages importée sous Micromine™ permet de comprendre comment s'organise l'évolution des teneurs en 3 dimensions (figure 120).

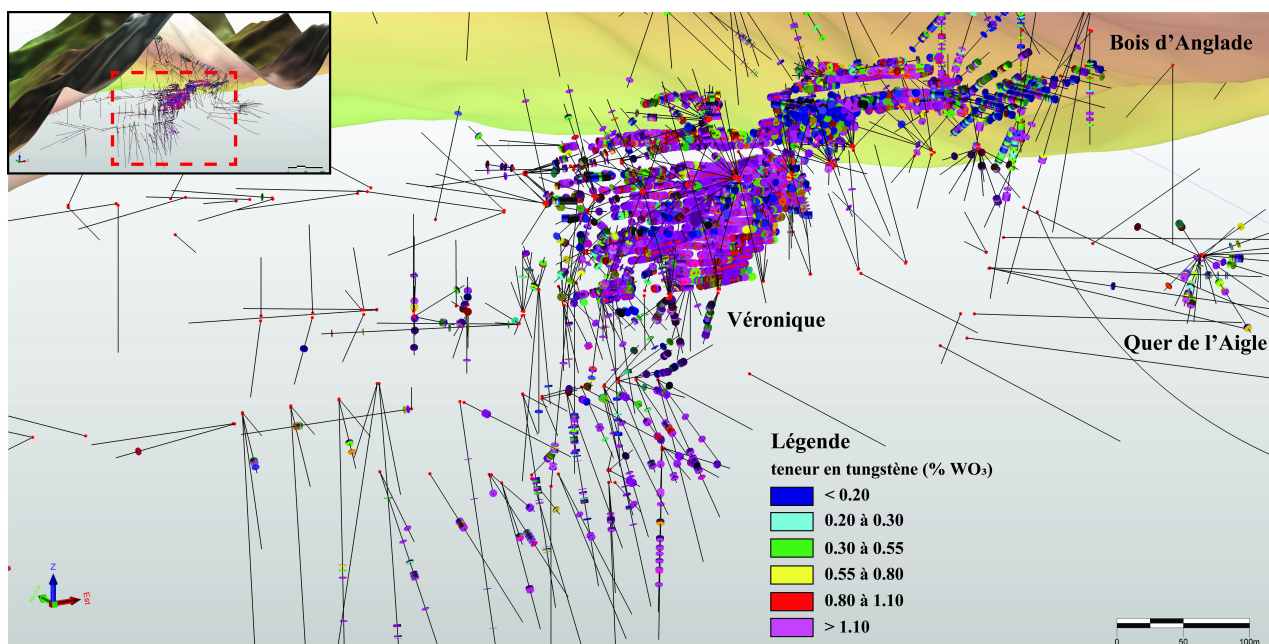


Figure 120 : Visualisation 3D vers le NE des analyses issues de la BDD sur le quartier Véronique (Micromine™)

La plupart des fortes teneurs en tungstène se distribuent au voisinage de la faille Véronique. Leur utilisation combinée à celle des logs lithologiques harmonisés donne une indication sur la structuration géologique au niveau du gisement (figure 121). Cette dernière apparaît complexe, notamment pour la corrélation entre sondages proches. Ceci s'explique simplement au vu de la morphologie très irrégulière du contact de l'intrusion granodioritique. La formation Sud étant affectée par le passage de la faille Véronique explique également certains décalages décelables en 3 dimensions.

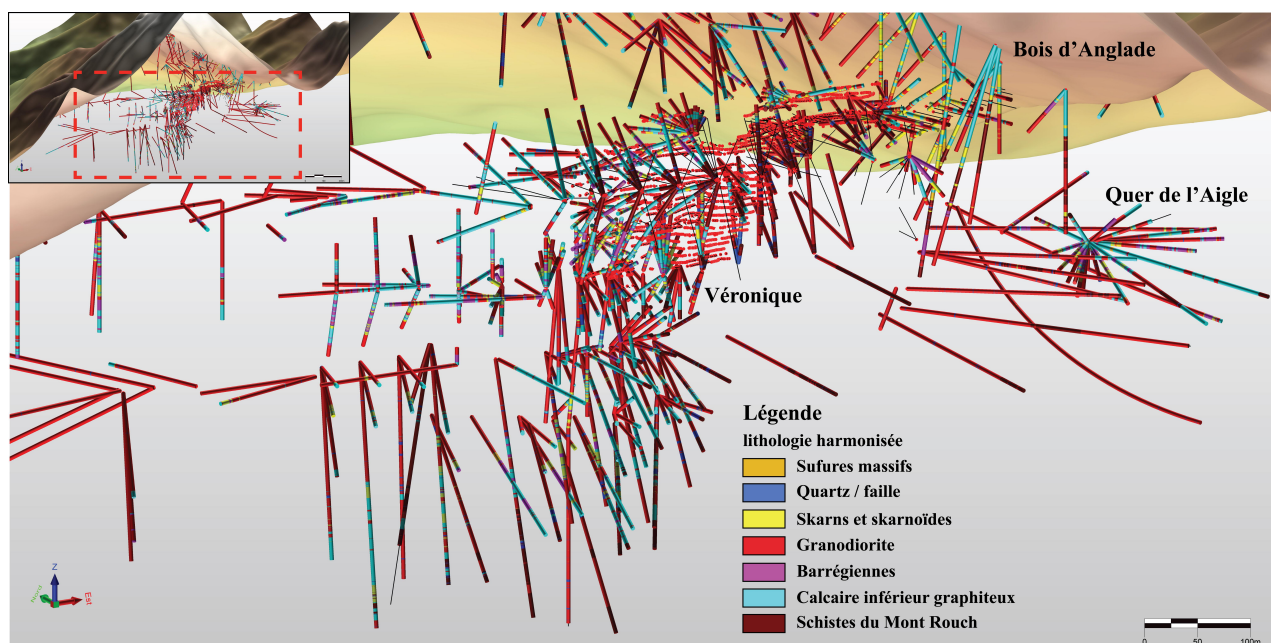


Figure 121 : Visualisation 3D vers le NE de la lithologie harmonisée sur le quartier Véronique (Micromine™)

iv. Modélisation des principaux corps minéralisés

La modélisation 3D des principaux corps minéralisés a été réalisée à partir des sondages intégrés dans la base de données. Elle concerne les corps minéralisés du Bois d'Anglade, du quartier Véronique, de la zone V, de la zone VI et du Quer de l'Aigle. Leur géométrie complexe a nécessité la réalisation de nombreuses coupes sérieées pour contraindre au mieux leur étendue. A titre d'exemple, la modélisation de la minéralisation du quartier Véronique a nécessité la réalisation de 48 coupes sérieées passant par les sondages numérisés (*figure 122*).

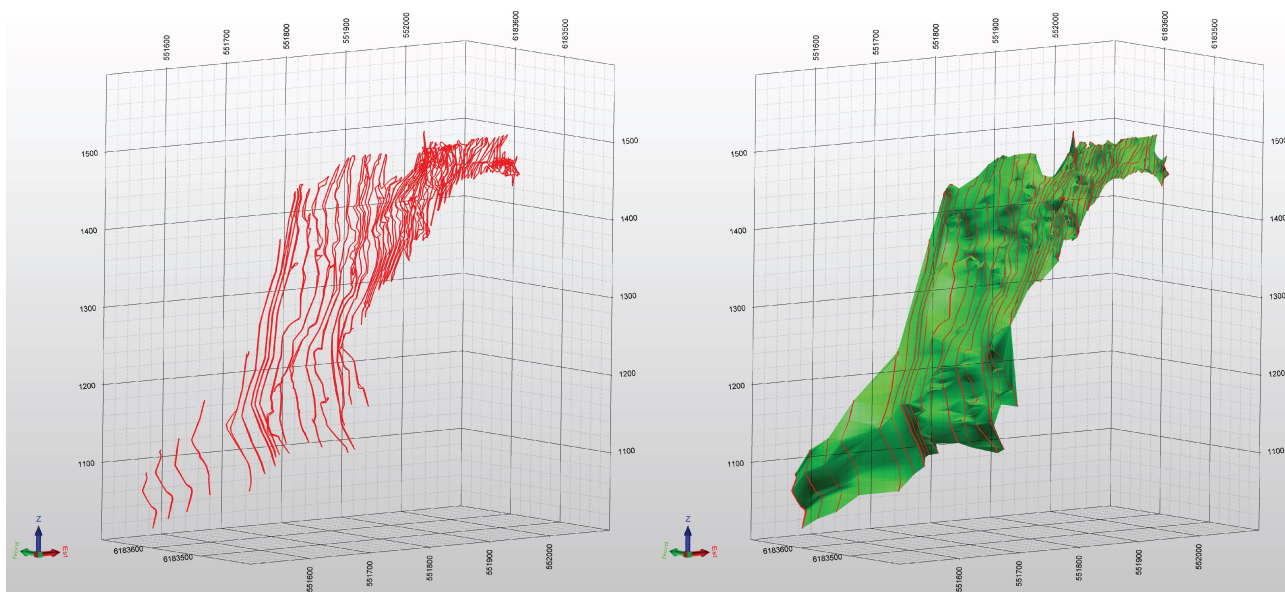


Figure 122 : Représentation 3D des coupes sérieées de la minéralisation du quartier Véronique, vue vers le NE (Micromine™)

La digitalisation de l'enveloppe minéralisée globale comprend le minerai à sulfures massifs et le skarn à silicates calciques. Elle a également été guidée par les teneurs en tungstène recoupées en sondage et les passes en dessous de 0,2 % WO_3 n'ont pas été intégrés à la modélisation. La triangulation ou "wireframing" entre les différentes coupes préalablement digitalisées est réalisée de manière automatique. Le logiciel calcule la triangulation selon l'alignement entre les nœuds de chaque section. Des corrections manuelles ont parfois été entreprises lorsque la forme des corps minéralisés devenait trop complexe (Bois d'Anglade, Véronique).

La validation des solides créés prend en compte la vérification des connexions invalides, des triangles d'intersection et des sections ouvertes. L'enveloppe 3D des minéralisations est valide quand ces 3 critères sont nuls. Les volumes suivants ont été obtenus à partir de l'enveloppe des différents corps minéralisés modélisés (*figure 123*) : Bois d'Anglade ($432\,775\text{ m}^3$), Quartier Véronique ($276\,218\text{ m}^3$), Zone VI ($13\,205\text{ m}^3$), Zone V ($18\,531\text{ m}^3$), Quer de l'Aigle ($15\,075\text{ m}^3$).

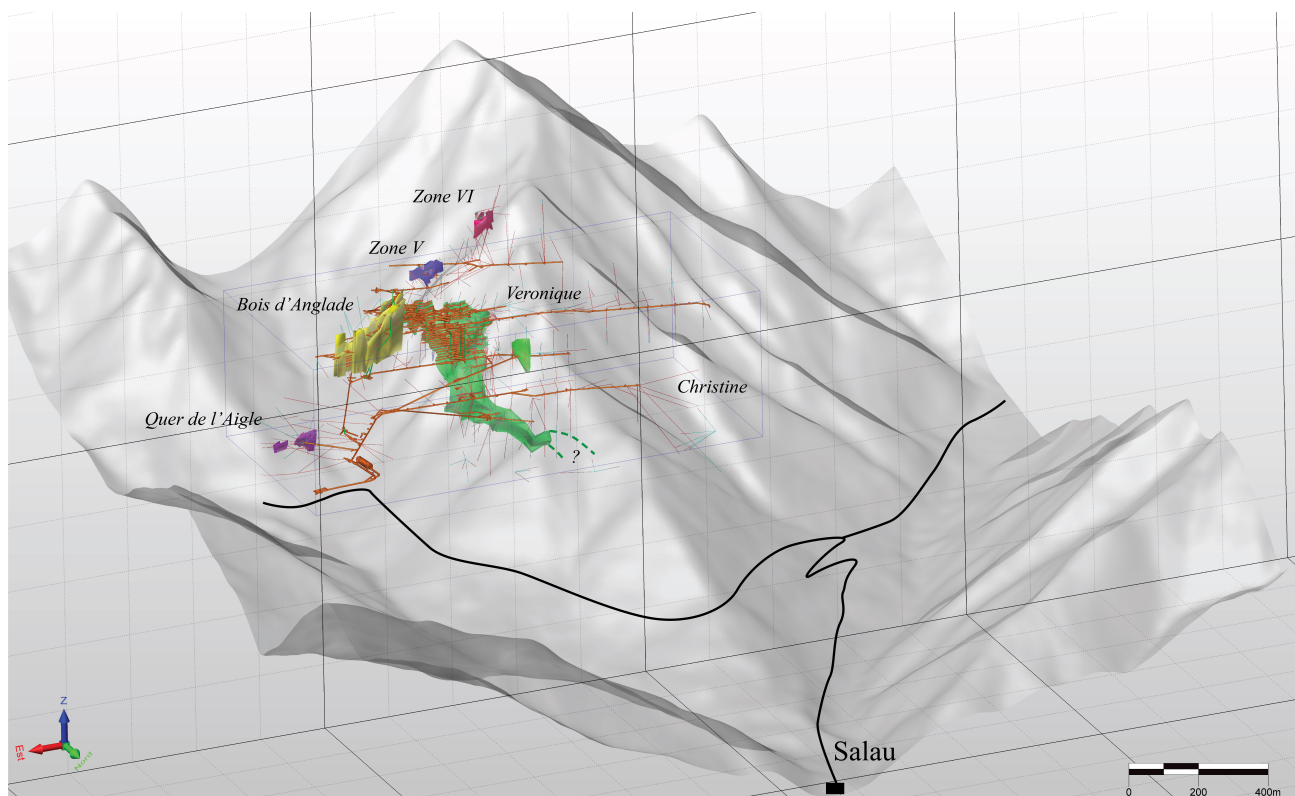


Figure 123 : Représentation 3D des principaux corps minéralisés du gisement de Salau (une couleur différente par corps minéralisé), vue vers le SW (Micromine™)

La modélisation réalisée permet de contraindre la distribution des corps minéralisés par rapport au passage de la faille Véronique, modélisée d'après les relevés en mine (figure 124).

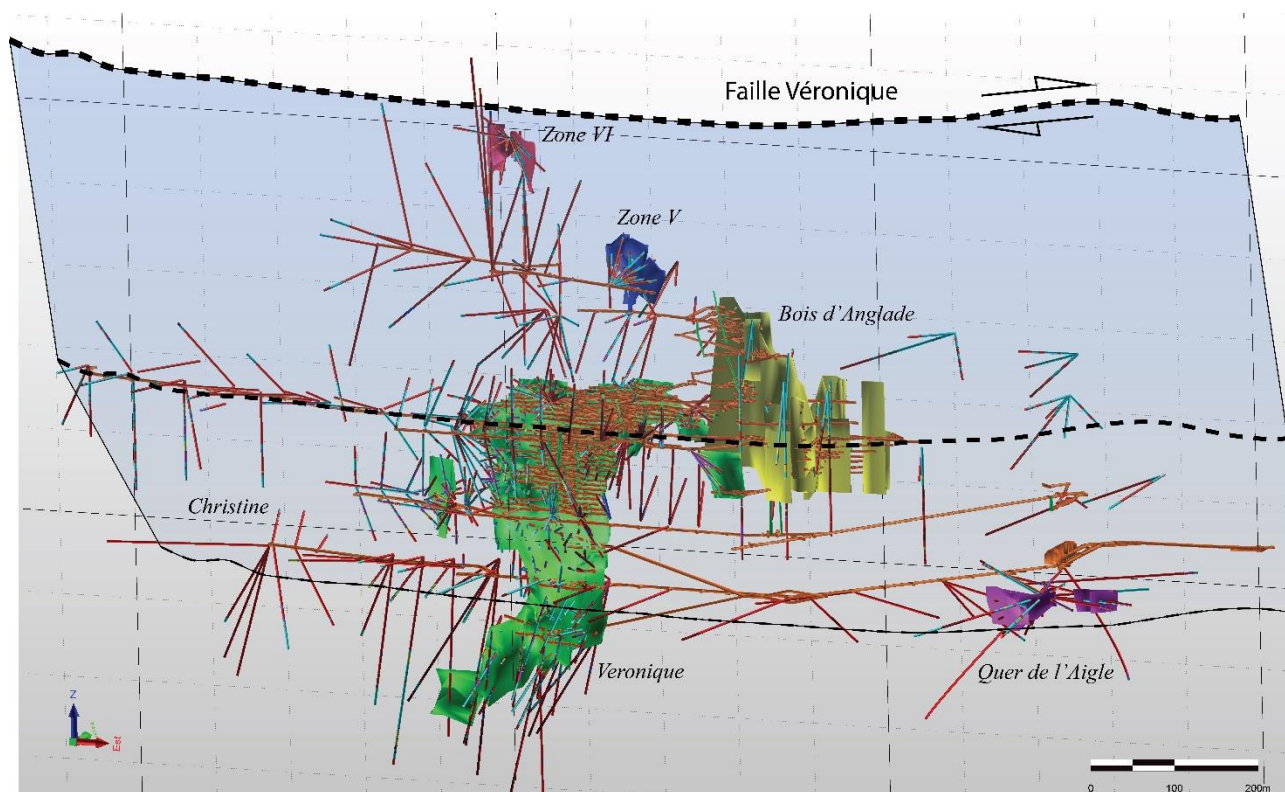


Figure 124 : Vue 3D vers le NW du passage de la faille Véronique par rapport aux différents corps minéralisés modélisés au sein du gisement de Salau. La légende lithologique harmonisée des sondages est détaillée dans le tableau 4.

La faille Véronique relie le quartier Véronique et la formation Sud du Bois d'Anglade, à l'instar ce qui a été observé ponctuellement sur le terrain. Par ailleurs, par projection, elle se propage également au sud des zones V et VI dans le ravin de la Fourque. Ces deux corps minéralisés semblent représenter ses seules manifestations en surface. A l'est du gisement, la faille intersecte la zone du Quer de l'Aigle où elle présente une minéralisation de type brèche à sulfures massifs (*figure 125*). Au niveau de cette zone, la granodiorite forme un contact très irrégulier avec l'encaissant ce qui explique la présence de nombreux golfes abritant des skarns. La faille se prolonge vers l'est sous le massif du Quer de l'Aigle. Une faille satellite E-W est présente 50m au nord de la faille Véronique. Elle est également minéralisée en sulfures massifs et scheelite grossière, mais elle n'est puissante que d'une cinquantaine de centimètres à un mètre.

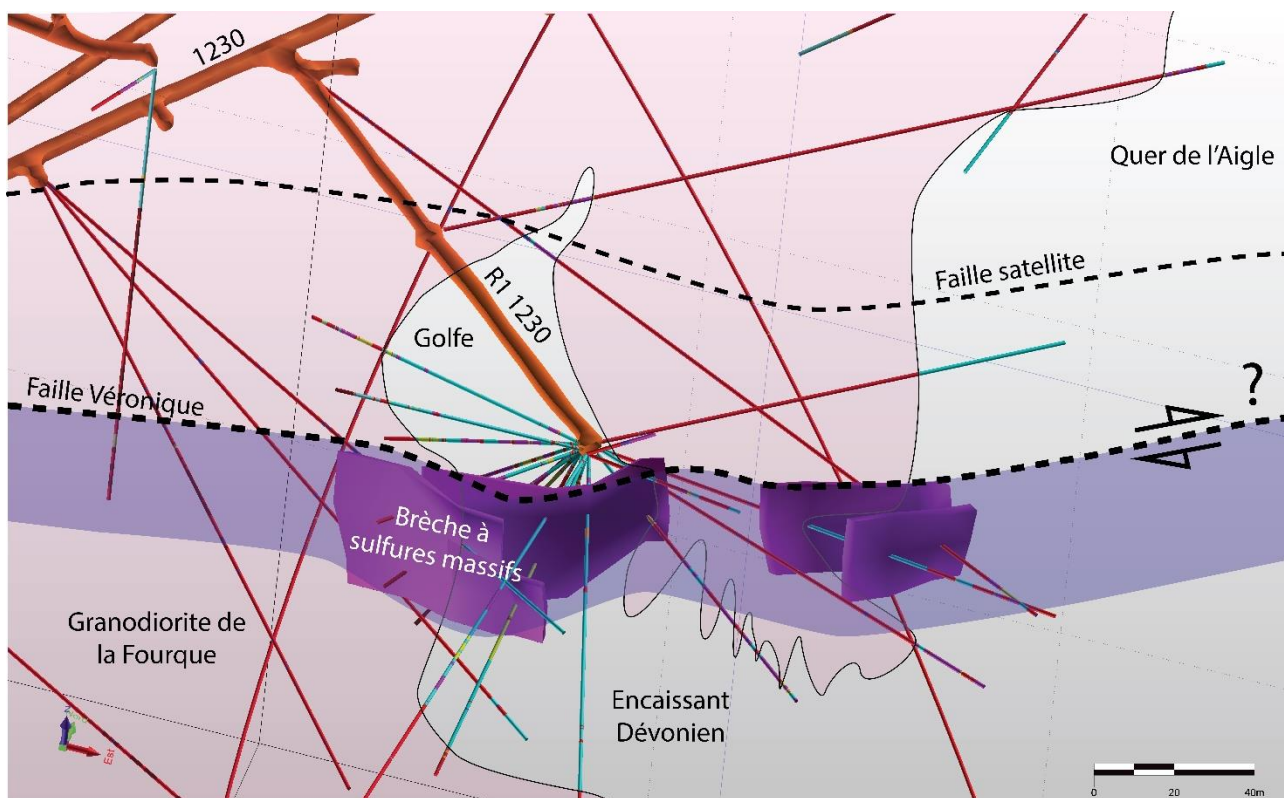


Figure 125 : Vue en 3D vers le NNE du passage de la faille Véronique au niveau des minéralisations du Quer de l'Aigle. La minéralisation à sulfures massifs et scheelite grossière est localisée dans une brèche développée le long de la faille. La légende lithologique harmonisée des sondages est détaillée dans le tableau 4.

Un des faits majeurs de cette modélisation 3D est la visualisation du décalage à l'échelle du gisement qu'elle engendre sur les corps minéralisés du quartier Véronique (*figure 126*). En effet, les deux compartiments de skarnoïdes identifiés par travaux miniers et sondages se retrouvent décalés selon un jeu inverse dextre de plus de 250 m de part et d'autre de la faille Véronique. Elle présente une direction moyenne N100°E 70°N et se matérialise par une brèche cimentée par des sulfures massifs et de la scheelite grossière au contact granodiorite – encaissant. Une seconde faille, satellite de Véronique, a été identifiée par sondage au sud du compartiment de skarnoïdes situé entre les côtes 1230 et 1050m. Elle se matérialise également par une brèche quartzeuse cimentée par des sulfures massifs et de la scheelite grossière. Son jeu semble identique à celui de la faille Véronique. Un autre compartiment de skarnoïdes devrait donc se trouver 200 m en aval au sud de cette faille satellite.

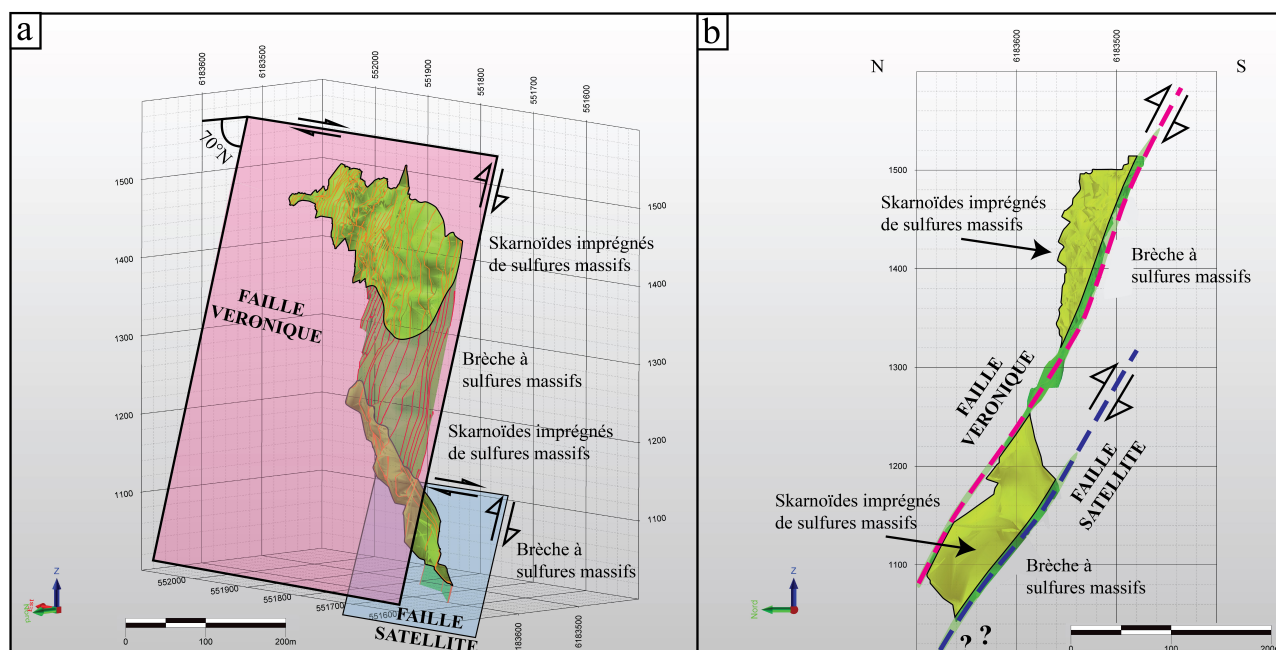


Figure 126 : Représentation 3D des minéralisations de la faille Véronique ; (a) Vue en 3D vers le SE des minéralisations du quartier Véronique. Les deux compartiments de skarnoïdes sont déplacés de plus de 250m selon un jeu inverse dextre ; (b) Vue en coupe N-S des minéralisations du quartier Véronique.

Les derniers sondages effectués par la SMA, dans l'axe de l'aval Véronique sont restés stériles, ce qui a posé un problème à l'époque, pour la compréhension de la géométrie des minéralisations. Une vue en plan (figure 127) permet de s'apercevoir que les deux derniers sondages sub-verticaux restés stériles auraient dû être inclinés de 60° vers le nord, par rapport à l'axe de la faille satellite qui encaisse l'extension de la minéralisation à sulfures massifs et scheelite grossière.

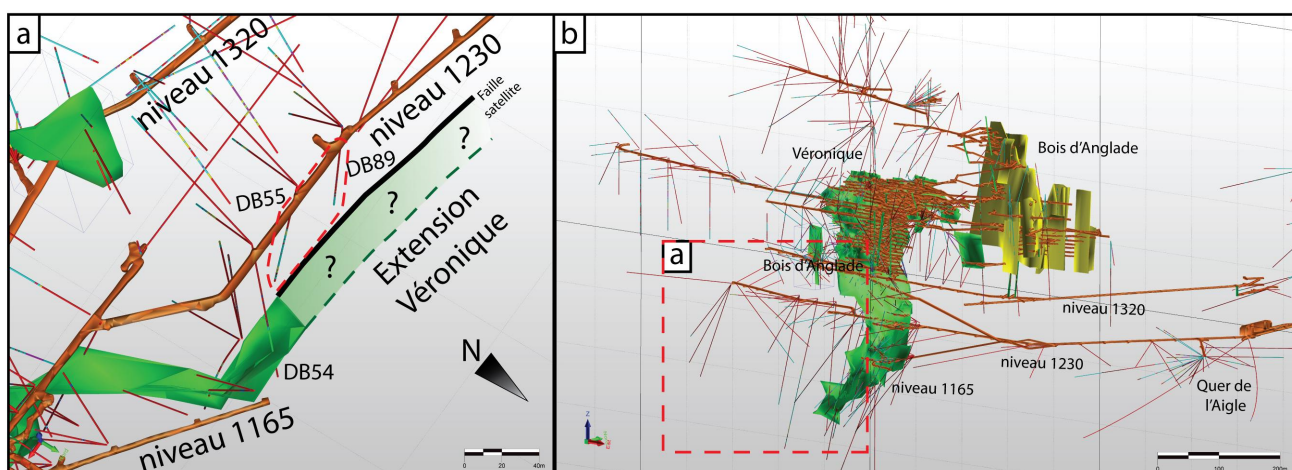


Figure 127 : (a) Représentation en plan de la projection de l'extension probable des minéralisations à l'aval du quartier Véronique ; (b) Vue en 3D vers le NW de l'ensemble des minéralisations du quartier Véronique et du Bois d'Anglade. La localisation du détail (a) est reportée.

c. Estimation de ressources

i. Etude variographique

L'estimation de volumes/teneurs s'est axée sur les corps minéralisés principaux modélisés. Cette estimation permet de donner une idée sur l'ordre de grandeur du volume de ressources valorisables. Pour des questions de rentabilité, la SMA ciblait préférentiellement les minéralisations sulfurées riches en scheelite ($> 0,8 \text{ \% WO}_3$ en moyenne), au voisinage de la faille Véronique. La conjoncture économique actuelle permet d'envisager le choix d'une teneur de coupure d'environ $0,3 \text{ \% WO}_3$ (Suárez Sánchez *et al.*, 2015). Ce changement permet d'intégrer dans les calculs, les minéralisations liées au skarn à silicates calciques et scheelite fine qui représente une part considérable du gisement de Salau.

Afin d'estimer la proportion de skarn par rapport aux minéralisations à sulfures massifs dans les corps minéralisés aux abords de la faille Véronique (Derré *et al.*, 1980), il a fallu réaliser un modèle de blocs pour le Bois d'Anglade. La part de skarn à silicates calciques et scheelite fine non exploitée (volume/tonnage/teneur) est obtenue par la différence entre le volume calculé avec le présent modèle et la production de la SMA sur ce corps minéralisé.

Les paramètres variographiques sont calculés à partir des analyses en WO_3 depuis la table correspondante dans la base de données des sondages. Dans un premier temps, il a fallu créer les fichiers composite des analyses afin d'avoir des teneurs normalisées sur chaque passe de sondage. Les paramètres choisis sont un intervalle composite de 50 cm (choisi en fonction de la puissance des passes analysées) et la méthode « best fit » afin d'ajuster au mieux ce pas sur la longueur du sondage.

Les paramètres statistiques de base (moyenne, mode, médiane, quartiles) ont été calculés. L'histogramme de distribution (*figure 128*) montre l'existence d'une famille de valeurs répartie selon une loi exponentielle. Par ailleurs, elle montre également que la majorité des valeurs sont situées en dessous de 1 \% WO_3 . Quelques valeurs « pépite » autour de 8 \% et 10 \% WO_3 ressortent légèrement, elles sont associées aux sulfures massifs montrant des teneurs élevées en scheelite.

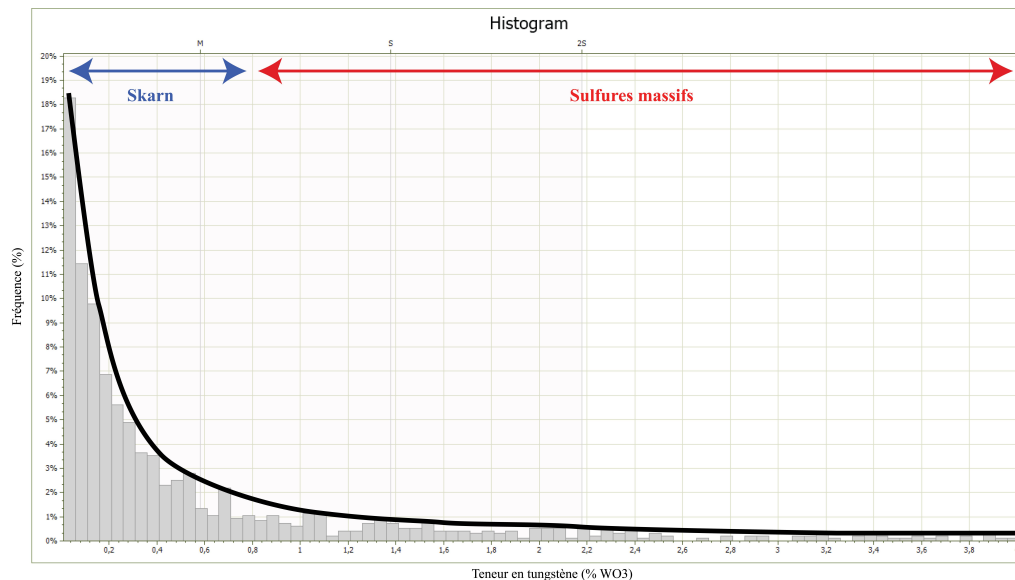


Figure 128 : Répartition statistique des valeurs composite (% WO₃) issues de la table analyse sur les sondages du Bois d'Anglade

Le modèle de variogramme est calculé à partir de ces valeurs. Les critères géologiques et structuraux montrent cartographiquement que le corps minéralisé du Bois d'Anglade présente une direction principale de continuité selon l'orientation N 265 85°S (*figure 127*). Le calcul intègre ce paramètre. Un lag de 20 mètres et une distance maximale de 100 mètres ont été pris en considération. Le modèle de variogramme résultant est sphérique et possède une portée de 48 mètres (*figure 129*). A partir de cette distance, les valeurs ne sont plus corrélées entre elles. Il est recommandé de prendre les deux tiers du palier ou la moitié de la portée pour évaluer la maille de sondage adaptée. Dans le cas présent, la valeur retenue est de 24 mètres pour ce type de corps minéralisé.

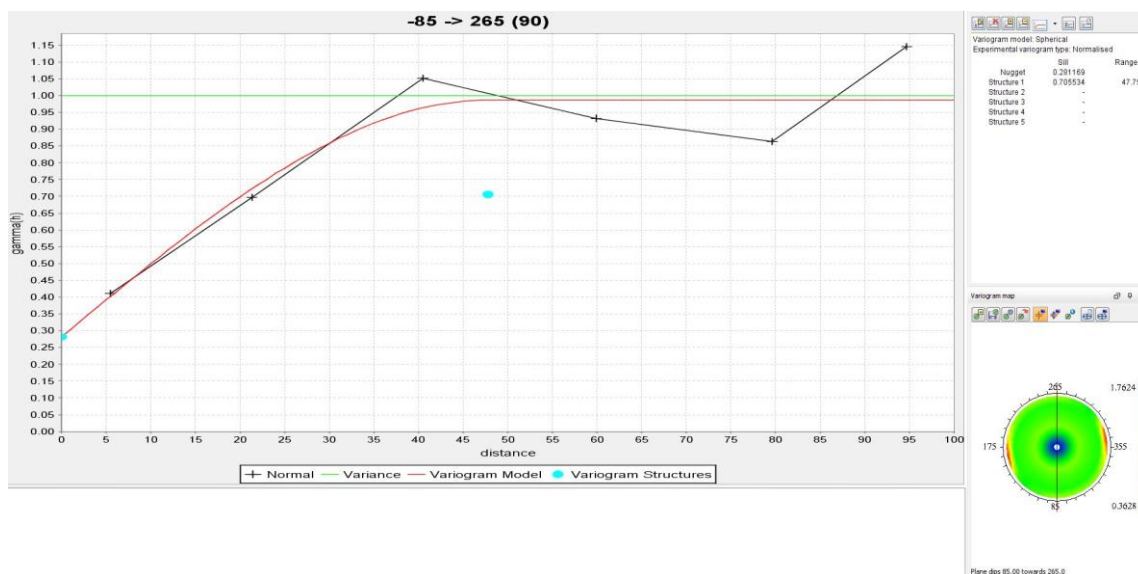


Figure 129 : Variogramme sphérique expérimental retenu pour le Bois d'Anglade selon la direction majeure de continuité N 265 E, -85°S

Les teneurs sont moins bien corrélées selon la direction N 175 qui montre une variance plus élevée avec l'augmentation de la distance. La maille optimale de sondages calculée (24 m) est semblable à celle employée par les mineurs à l'époque pour ce type de corps minéralisés (de l'ordre d'une vingtaine de mètres).

ii. Création d'un modèle de blocs

Un modèle de blocs a été construit sur le corps minéralisé du Bois d'Anglade dans le but de quantifier la part de skarn par rapport à celles des sulfures massifs en tenant compte des variabilités locales de teneurs dans le minéral. Le résultat permettra de visualiser l'impact de la variation de la teneur de coupure sur le volume de minéralisation économique.

Le variogramme préalablement défini est utilisé pour définir la maille des blocs élémentaires. La taille des blocs a été dimensionnée en fonction des paramètres d'une potentielle réexploitation. La dimension des corps minéralisés a également été prise en compte (globalement 80 m de longueur, 5 à 6 m de largeur et 150 à 200 m de hauteur). Une maille cubique de 5 m de côté avec des subdivisions de 2,5 m de côté est retenue. Il a aussi été choisi de ne pas considérer les blocs qui ne sont pas totalement contenus dans l'enveloppe afin de ne pas surestimer le volume minéralisé (*figure 130*).

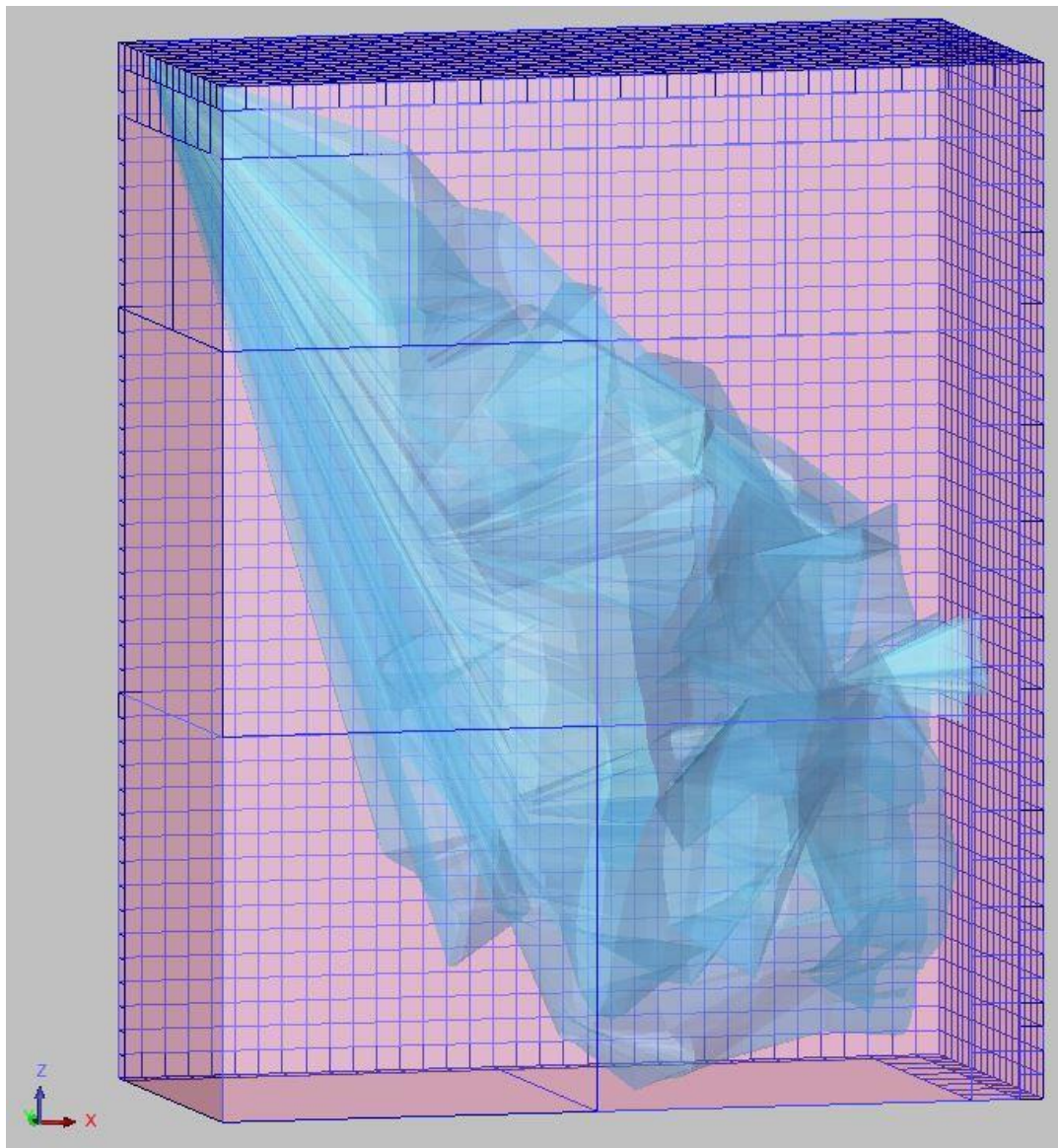


Figure 130 : Représentation 3D du bloc model appliqué à l'emprise rectangulaire de l'enveloppe minéralisée du Bois d'Anglade en bleu, vue vers le Nord.

Le modèle de blocs créé est appliqué à l'emprise rectangulaire de l'enveloppe minéralisée. L'enveloppe interpolée est définie en tant que minéralisation qui donne les limites du modèle et du calcul. Un attribut définit cette dernière comme « matériel », son intérieur est nommé « minerai ». L'estimation est appliquée à l'enveloppe minéralisée précédemment spécifié (*figure 131*).

Le calcul du volume du corps minéralisé modélisé est de 432 775 m³. Le volume de minéralisation approché par le modèle de blocs est de 433 578 m³. Le volume minéralisé estimé par la modélisation des blocs est donc en cohérence avec l'enveloppe minéralisée numérisée à partir des coupes sérieées.

L'enveloppe 3D considérée prend en compte les sulfures massifs et le skarn à silicates calciques, possédant deux densités différentes. Une densité pondérée par le volume a donc été calculée. Selon [Guiraudie et al., 1964](#) ; les densités des différents corps minéralisés sont de 3,15 pour les skarns à silicates calciques (pauvres en scheelite) et de 4,4 pour les sulfures massifs (riches en scheelite).

Il a été exploité 483 825 t de minerai à 1,15 % WO₃, soit 5 564 t WO₃ représentant 109 960 m³ de minerai riche en scheelite. Le volume de skarn à silicates calciques et scheelite fine est donc de $433\,578 - 109\,960 = 323\,618$ m³.

Le calcul de la densité pondérée par le volume est : $\frac{(323\,618 * 3,15) + (109\,960 * 4,4)}{433\,578}$ donnant une densité moyenne pour l'ensemble de 3,47. Cette valeur est utilisée pour convertir le volume de minerai en tonnage.

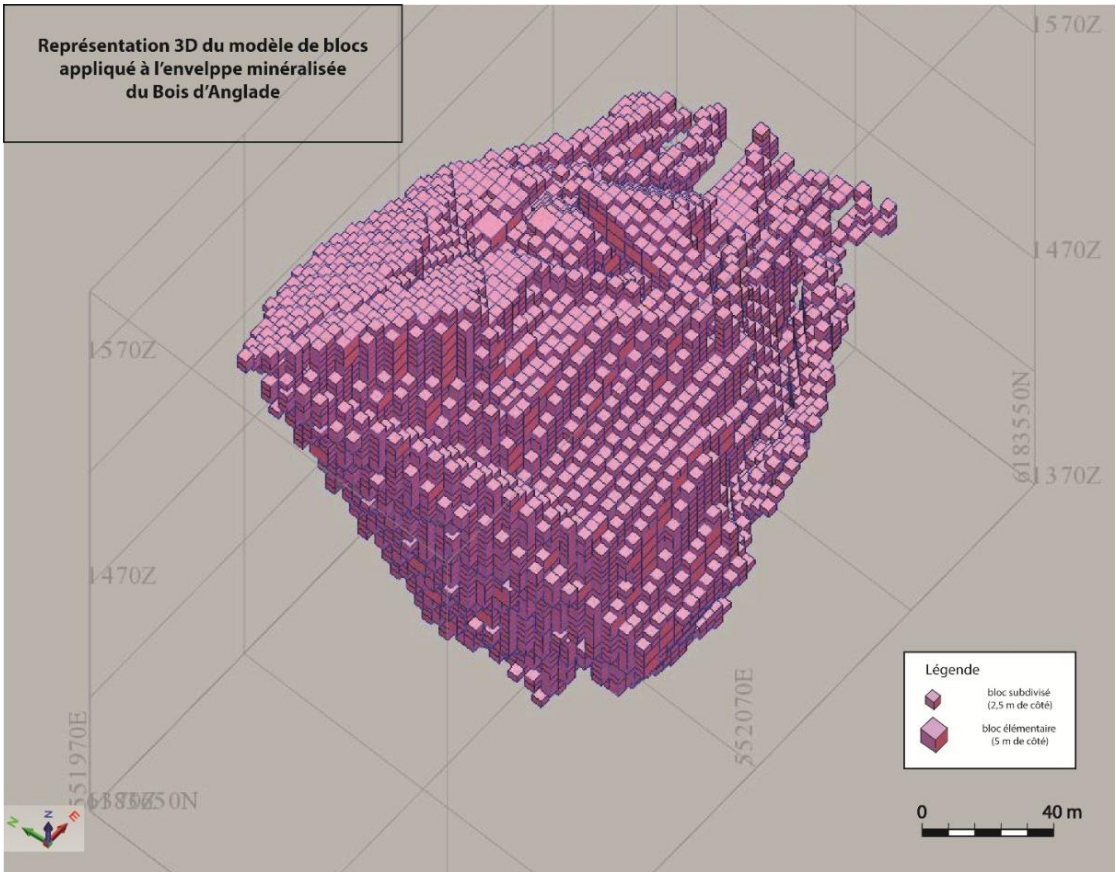


Figure 131 : Représentation 3D du modèle de blocs sur l'enveloppe minéralisée du Bois d'Anglade, vue vers le NE

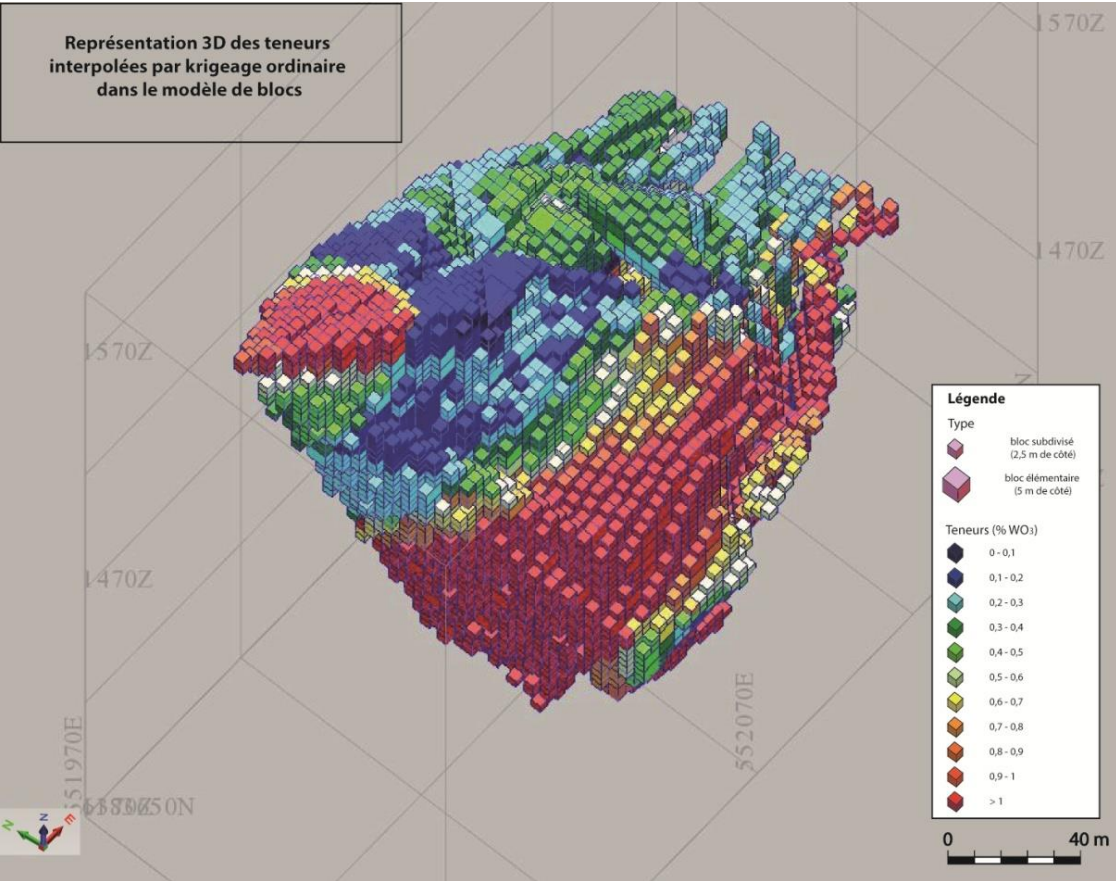


Figure 132 : Représentation 3D des teneurs en WO₃ interpolées par krigeage ordinaire dans le modèle de blocs, vue vers le NE

Le modèle de variogramme défini précédemment a été appliqué pour calculer la teneur en WO_3 dans chaque bloc (figure 132). L'ellipsoïde retenu est paramétré avec une direction N 265, un plongement de 0 et un pendage de -85° Sud. Ces valeurs correspondent à la direction majeure de continuité structurale du corps minéralisé du Bois d'Anglade déduite des observations géologiques. Les ratios axe majeur / semi-majeur est de 1,5 et celui de l'axe majeur / mineur est de 2. Le rayon de recherche maximale est étendu à 500 m horizontalement et verticalement.

La figure 133 montre en coupes traversant le modèle de blocs, la richesse du minerai au contact de la faille Véronique dans la formation Sud. L'interpolation des teneurs dans les blocs a été réalisée selon 2 méthodes (krigeage ordinaire et inverse de la distance au carré) afin de les comparer. La différence (delta) entre ces 2 techniques, montre que 75 % des valeurs interpolées ont un écart compris entre -0,2 et + 0,3 %. Les résultats de l'interpolation semblent donc cohérents entre eux. Le krigeage ordinaire, réputé pour être la meilleure méthode d'estimation linéaire en raison de sa plus faible variance, a été retenu pour calculer les ressources.

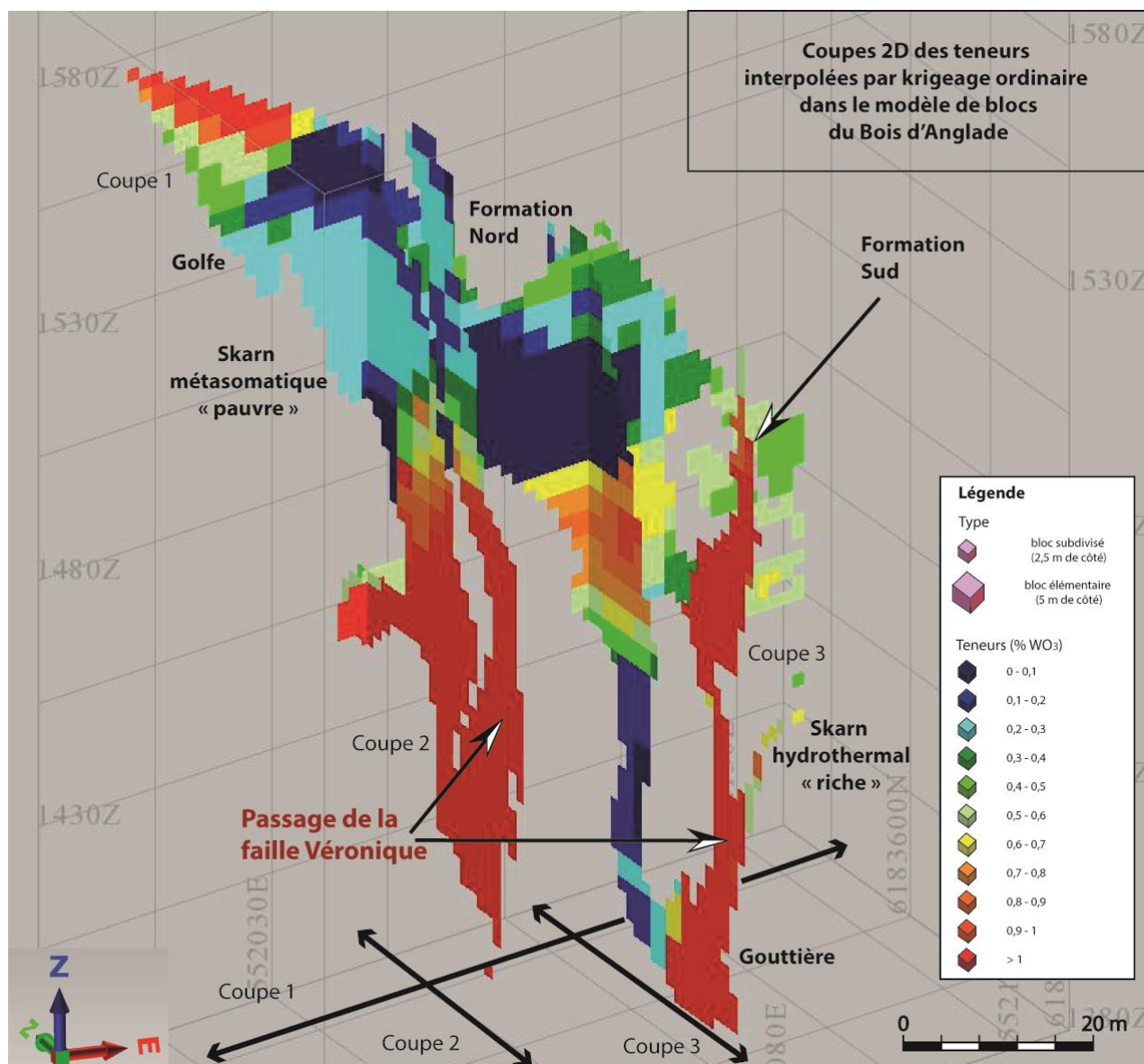


Figure 133 : Coupes 2D des teneurs interpolées par krigeage ordinaire dans le modèle de blocs du Bois d'Anglade

Le rapport de ressources permet de récapituler les paramètres issus de l'interpolation du modèle de blocs et de donner les valeurs pour construire la courbe tonnage/ teneur. Le tonnage total de minerai est de 1 504 516 t à 0,76 % WO_3 , soit 11 434 t WO_3 , en considérant toute la gamme de teneurs dans les blocs. En appliquant un *cut off* de 0,3 % WO_3 , le calcul par krigeage ordinaire donne un tonnage de 993 179 t de minerai à 1,06 % WO_3 , soit 10 527 t WO_3 . Le calcul par inverse de la distance au carré donne un tonnage de 1 031 186 t de minerai à 1,06 % WO_3 , soit 10 930 t WO_3 . En retranchant la part de minerai déjà exploitée historiquement (5 564 t WO_3), le calcul montre qu'il reste environ 4 960 t WO_3 , correspondant au skarn à scheelite fine dans le corps minéralisé du Bois d'Anglade.

Le skarn représente 47 % du tonnage total du corps minéralisé. Les minéralisations de type « fond de golfe » représentent par conséquent des cibles majeures en considérant les paramètres économiques actuels (teneur de coupure de 0,3 % WO_3). Cette proportion entre les différents types de minéralisations est corroborée par l'étude croisée du plan du niveau 1452 (*figure 134*) et de la coupe synthétique du Bois d'Anglade (*figure 135*). La part de skarn concernant le tonnage de minerai donne des résultats de 46 et 45 % respectivement. Les résultats en 2D et 3D semblent cohérents et valident les valeurs obtenues dans le modèle de blocs.

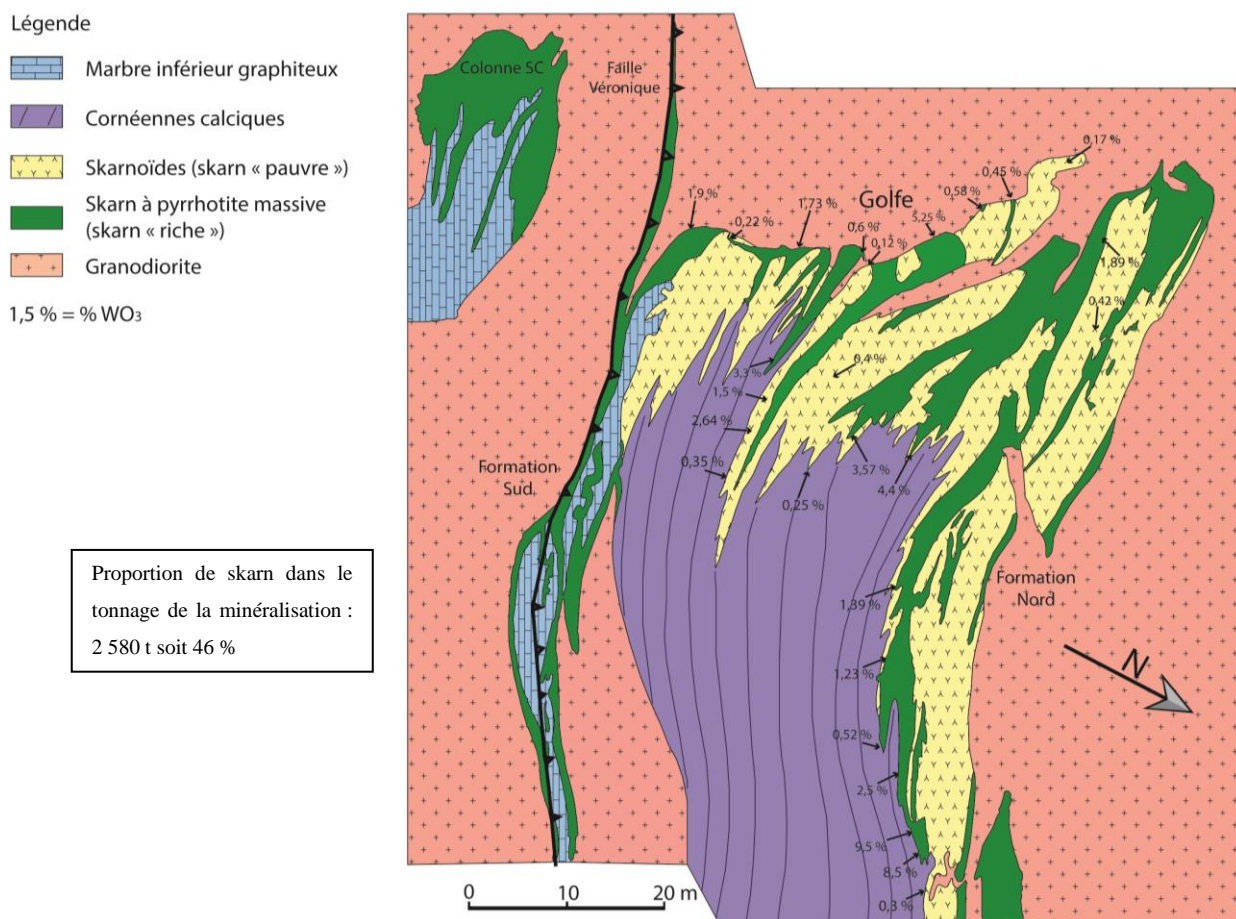


Figure 134 : Carte de l'interprétation géologique du niveau 1452 m pour le corps minéralisé du Bois d'Anglade

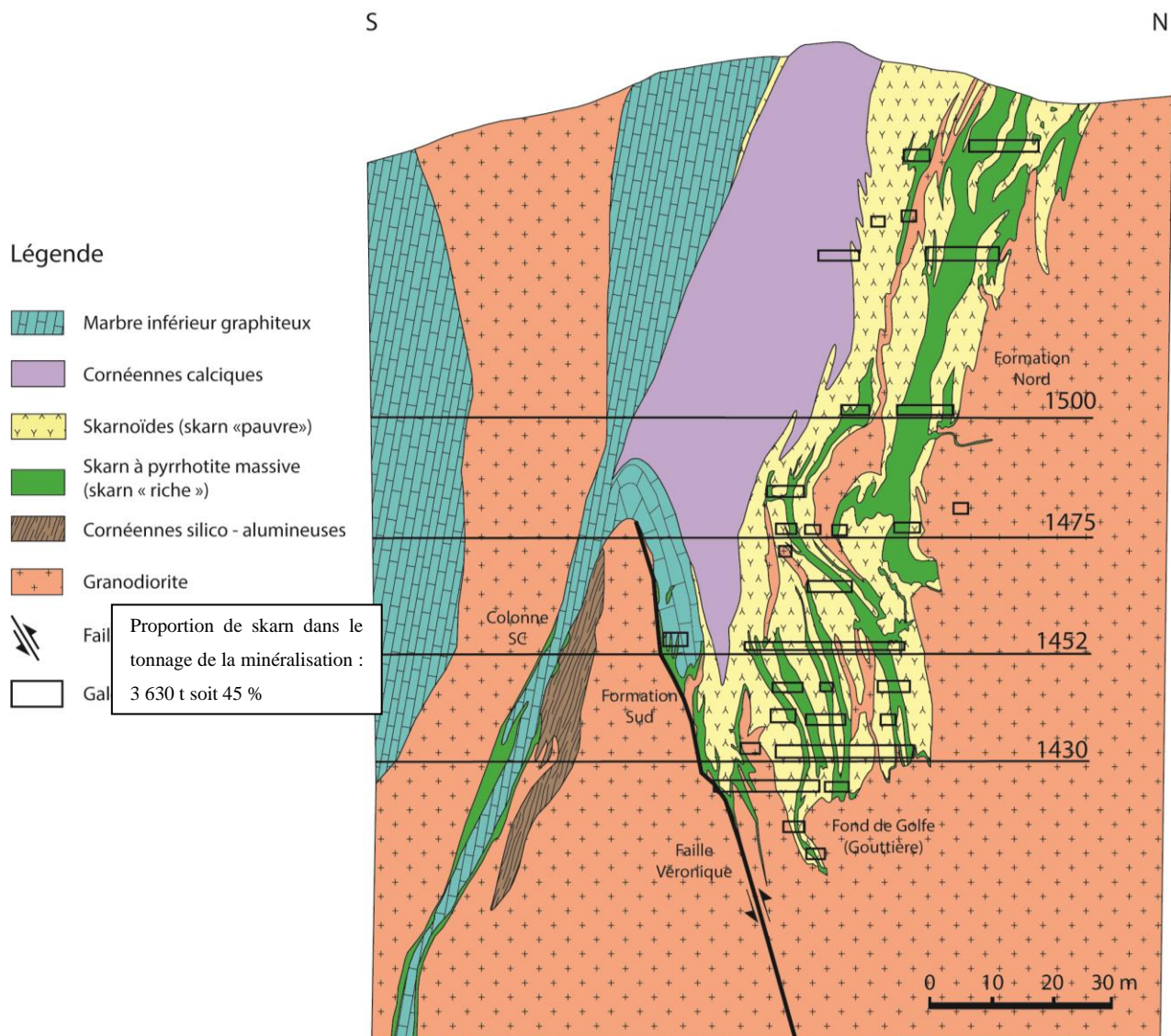


Figure 135 : Coupe N-S synthétique à travers la zone du Bois d'Anglade

A partir du modèle de blocs, il est possible de construire la courbe tonnage/ teneur pour les corps minéralisés de type « fond de golfe » (figure 136). Elle montre l'influence de la variation de la teneur de coupure sur le tonnage de minerai exploitable et la teneur moyenne associée. Ce graphique se lit en plaçant un curseur vertical sur l'axe des abscisses représentant la teneur de coupure en % WO_3 . Pour connaître le tonnage de minerai et la teneur moyenne correspondante, il suffit de lire ces valeurs en se référant à la courbe associée à chaque information.

La tranche de minerai avec des teneurs s'échelonnant entre 0,2 et 0,8 % WO_3 correspond aux skarns qui représentent une part de même importance que la fraction de sulfures massifs et scheelite grossière associée aux teneurs supérieures à 0,8 % WO_3 .

Cette figure montre aussi que le choix du *cut off* entre 0,2 % et 0,3 % WO_3 est critique pour ce type de corps minéralisés. Cette variation de 0,1 % se traduit par la prise en compte ou l'exclusion de 200 000 t de minerai. Des travaux supplémentaires doivent être réalisés pour déterminer avec précision la teneur de coupure dans le gisement qui est un paramètre critique.

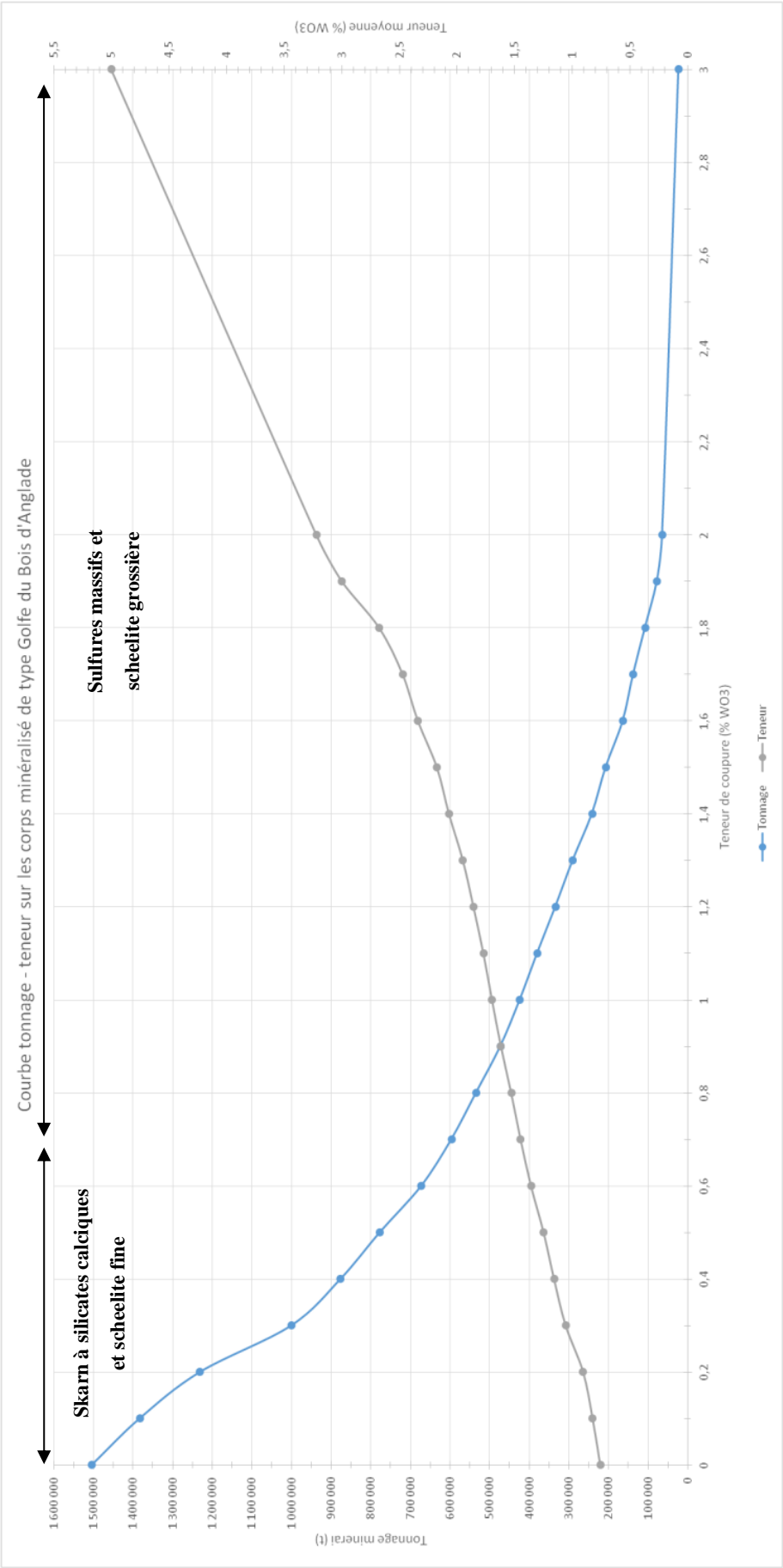


Figure 136 : Courbe tonnage - teneur du corps minéralisé de type "fond de Golfe" du Bois d'Anglade

iii. Estimation des ressources potentielles et synthèse 3D du gisement

Evolution des ressources / réserves durant l'exploitation (1970-1986)

A l'ouverture de la mine en 1970, les ressources estimées étaient de 580 000 t de minerai à 0,9 % WO_3 , soit 5 200 t WO_3 grâce aux travaux d'exploration menés par le BRGM. Les quatre premiers corps minéralisés découverts par le BRGM furent ceux du Bois d'Anglade (Formation Nord, Golfe, Formation Sud, Colonne SC) (Derré *et al.*, 1980).

En 1976, 419 349 tonnes de minerai avec une teneur moyenne de 1,41 % ont été exploitées pour produire 5 360 tonnes de WO_3 , à partir des 4 principaux corps minéralisés (tableau 6).

| Production des différents corps minéralisés exploités (1976) | | | |
|--|---------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Corps minéralisés | Tonnage minerai (t) | Teneur moyenne WO_3 (%) | Tonnage WO_3 (t) |
| Formation Nord | 222 806 | 1,06 | 2362 |
| Golfe | 44 000 | 1,09 | 480 |
| Formation Sud | 96 543 | 1,39 | 1342 |
| Colonne SC | 56 000 | 2,1 | 1176 |
| Total | 419 349 | 1,41 | 5360 |

Tableau 6 : Production des différents corps minéralisés exploités (1976) (Derré *et al.*, 2014)

En 1975, la SMA découvre la lentille Véronique à partir d'une campagne de sondages fond sur une anomalie géophysique. L'estimation des ressources correspond à un volume minéralisé de 350 000 t à 1,83 % WO_3 , correspondant à 6 500 t WO_3 .

L'exploitation du gisement entre 1970 et 1986 totalise une production de 13 950 t WO_3 . Les principaux corps minéralisés exploités furent le Bois d'Anglade (6 740 t WO_3) et la lentille Véronique (6 600 t WO_3).

Ré-estimation des ressources potentielles basée sur les paramètres économiques actuels

L'estimation des ressources potentielles s'est appuyée sur toutes les données qui ont pu être réunies sur le gisement de Salau à ce jour : métallotectes, sondages, analyse structurale, estimations historiques, morphologie des corps minéralisés, géophysique, indices minéralisés.

Toutes ces observations, permettent d'envisager un potentiel de l'ordre de **11 800 à 15 600 t WO_3** au niveau de la partie sud du massif de la Fourque, dans les travaux réalisés par la SMA. L'estimation se décompose ainsi :

En pondérant les densités en fonction des différents corps minéralisés (3,15 pour le skarn et 4,4 pour les sulfures massifs ; [Guiraudie et al., 1964](#)), il est possible de calculer le tonnage de minerai à partir des volumes modélisés :

- Véronique : essentiellement composée de sulfures massifs (80 %) --> $(0.8 * 276\,217\text{ m}^3) * 4.4 + (0.2 * 276\,217\text{ m}^3) * 3.15 = 972\,283\text{ t} + 174\,016\text{ t} = 1\,146\,299\text{ t}$ de minerai
- Bois d'Anglade : skarn (75 %) et sulfures massifs (25 %) --> $(0.25 * 433\,578\text{ m}^3) * 4.4 + (0.75 * 433\,578\text{ m}^3) * 3.15 = 925\,271\text{ t} + 662\,410\text{ t} = 1\,504\,516\text{ t}$ de minerai
- Quer de l'Aigle: skarn (30 %) et sulfures massifs (70 %) --> $(0.7 * 15\,074\text{ m}^3) * 4.4 + (0.3 * 15\,074\text{ m}^3) * 3.15 = 46\,428\text{ t} + 14\,244\text{ t} = 60\,672\text{ t}$ de minerai
- Zone V and Zone VI: (skarn 40 %) et sulfures massifs (60 %) --> $(0.6 * 31\,735\text{ m}^3) * 4.4 + (0.4 * 31\,735\text{ m}^3) * 3.15 = 83\,780\text{ t} + 39\,986\text{ t} = 123\,766\text{ t}$ de minerai

Total: **2 835 253 t** de minerai.

La teneur moyenne approximative en tungstène des corps minéralisés peut être approximée grâce aux données historiques de production et d'estimation (en utilisant un *cut off* de 0.3 % WO_3 ainsi que des barres d'erreurs minimum-maximum) :

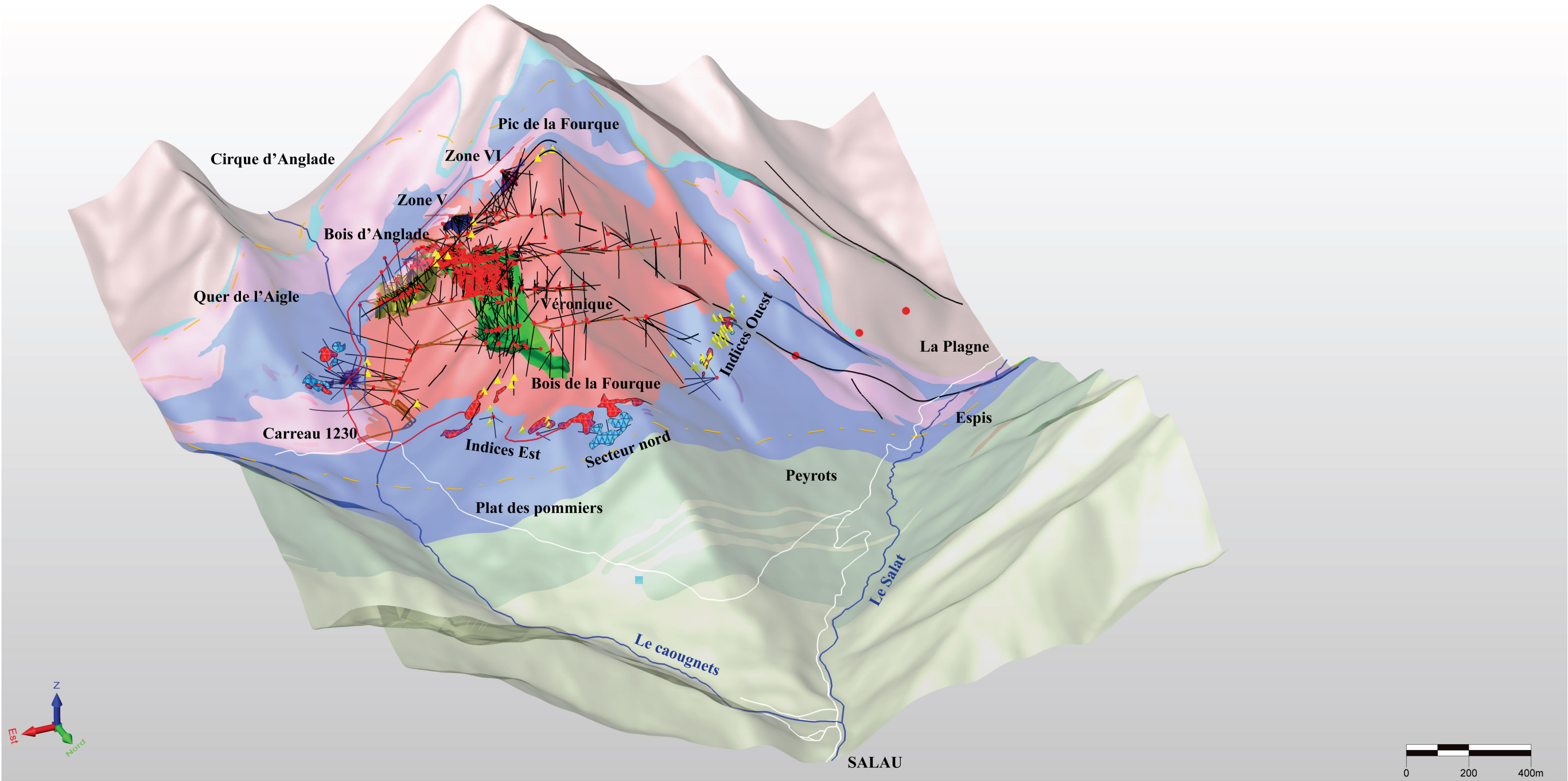
- Véronique : 1 146 299 t pour 1.2 - 1.5 % $\text{WO}_3 = 13\,755 - 17\,194\text{ t } \text{WO}_3$
- Bois d'Anglade : 993 179 t pour 1,06 % $\text{WO}_3 = 10\,527\text{ t } \text{WO}_3$
- Quer de l'Aigle : 60 672 t pour 0.8 - 1 % $\text{WO}_3 = 485 - 606\text{ t } \text{WO}_3$
- Zone V et Zone VI : 123 766 t pour 0.8 - 1 % $\text{WO}_3 = 990 - 1\,237\text{ t } \text{WO}_3$

Total (avant soustraction de l'exploitation historique) : **25 757 – 29 564 t WO_3** .

Total (après soustraction): **11 807 – 15 614 t WO_3** .

Cette estimation potentielle représente une hypothèse préliminaire de travail basée sur l'interprétation des documents et des données ayant pu être récupérés à ce jour. Elle intervient de manière précoce dans le processus d'estimation détaillée des ressources en cours et il ne faut lui attribuer qu'une valeur très approximative. L'étude de modélisation 3D, actuellement en cours et menée en partenariat avec CSA Global, va permettre de calculer et de classer précisément les ressources

Par ailleurs, plusieurs arguments (lithologiques, structuraux, conceptuels) montrent également qu'il pourrait exister des corps minéralisés à découvrir autour de l'intrusion granodioritique de la Fourque et dans l'extension de l'auréole de métamorphisme de contact qui s'étend vers l'ouest jusqu'en Espagne (*figure 137*). D'autres cibles comme la lentille Christine avec **3,5 % WO_3 sur 1,85 m** (sondages S3 et DB91) et d'extension inconnue ou les tailings (retraitement) pourraient également contribuer à augmenter le potentiel.



Légende

éléments administratifs

- routes
- rivières

indices minéralisés

- skarn à scheelite
- SEDEX à galène et sphalérite
- filonnets de pyrrhotite

éléments structuraux

- faille observée
- faille supposée

isogrades de métamorphisme

- grenat, pyroxène, vésuvianite
- albite, trémolite, biotite
- biotite

anomalies magnétiques

- negative
- positive

lithologie harmonisée

- Quartz / faille
- Skarns et skarnoïdes
- Granodiorite
- Sills de microdiorite et microgranite
- Calcaire de Carboire
- Schistes bleutés
- Calcaire supérieur
- Barrégiennes
- Calcaire inférieur graphiteux
- Schistes du Mont Rouch

Figure 137 : Vue 3D vers le SW de la distribution des corps minéralisés et des indices issus du modèle réalisé à l'échelle du gisement de Salau

Chapitre VIII

DISCUSSION – SYNTHÈSE

VIII. Discussion / Synthèse

La synthèse présentée dans ce chapitre rappelle les résultats majeurs de cette thèse et les implications à plus grande échelle qui en découlent. Dans un premier temps, nous discuterons de l'histoire du gisement à tungstène et or de Salau que l'étude de terrain à l'échelle des corps minéralisés, couplée aux études minéralogique, géochronologique et isotopique nous a permis de déconvoluer en 2 principaux épisodes, replacés dans leur contexte régional. Puis, nous présenterons une révision du modèle métallogénique auquel était rattaché ce gisement ainsi que les nouveaux métallotectes qui en découlent. Dans un second temps, nous évoquerons 1) les conséquences de nos résultats sur l'évolution du magmatisme dans la Zone axiale des Pyrénées et 2) leurs implications pour la métallogénie du tungstène et de l'or dans l'évolution tardi-orogénique de la chaîne varisque. Enfin, nous discuterons de la durée de vie des systèmes magmatiques et hydrothermaux qui reste une question encore largement débattue à l'échelle mondiale.

a. Histoire polyphasée et modèle métallogénique du gisement de Salau

i. Observations et résultats de terrain

Jusqu'alors, le gisement de Salau et l'indice voisin d'Aurenère étaient considérés comme des minéralisations de type skarn à scheelite (Fonteilles & Machairas, 1968 ; Derré, 1973 ; Soler, 1977 ; Derré *et al.*, 1980 ; Derré, 1982 ; Kaelin, 1982 ; Derré *et al.*, 1984 ; Lecouffe, 1987 ; Zahm, 1987 ; Fonteilles *et al.*, 1988 ; Krier-Schellen, 1988 ; Fonteilles *et al.*, 1989 ; Palau i Ramirez *et al.*, 1995, 1997). Il était admis que la minéralisation de Salau s'était formée en deux temps, (1) un stade prograde où le métasomatisme au contact de l'intrusion transforme les roches carbonatées en skarns à silicates calciques et (2) un stade rétrograde accompagné d'une « altération hydrothermale » où les skarns précédemment formés, étaient imprégnés de sulfures massifs (Derré *et al.*, 1980 ; Fonteilles *et al.*, 1989). L'essentiel de la scheelite apparaissait durant ce stade rétrograde (Lecouffe, 1987). La même évolution chronologique a été proposée sur Aurenère (Palau i Ramirez, 1998). Étant donné que l'exploitation historique ciblait les minéralisations à forte teneur, certains auteurs avaient remarqué que la faille E-W à pendage 70°N (la faille Véronique) concentrait l'essentiel de ces dernières (Soler, 1977 ; Kaelin, 1982, Ledru, 1986 ; Ledru & Autran, 1987 ; Fonteilles *et al.*, 1989). Même si l'hypothèse d'un système minéralisé polyphasé émergeait finalement pour expliquer les différences de teneurs (Ledru & Autran, 1987 ; Fonteilles *et al.*, 1989), elle n'a pas été prouvée et travaillée davantage. Jusqu'ici, le district à tungstène de la Zone axiale des Pyrénées était donc constitué de gisements de type skarn à scheelite. Il en fut de même pour l'or associé au minerai de tungstène, il fut découvert vers la fin de vie de la mine mais sa présence n'a jamais fait l'objet d'une attention particulière, malgré l'importance des indices alluvionnaires du secteur (Vic & Tourlière, 2016).

Le levé cartographique de l'ensemble du secteur de Salau-Aurenère a permis de caractériser la distribution régionale des minéralisations rencontrées. Nous avons pu voir que la plupart des indices se trouvaient en amas et en périphérie des intrusions granodioritiques. Certaines minéralisations particulièrement riches en sulfures et en scheelite se localisent à l'intersection du contact intrusion-encaissant et au sein de failles E-W tardives

(figure 197). L'essentiel des occurrences décrites sont réparties au sein d'une auréole de métamorphisme de contact (isograde à biotite) qui s'étend sur plus de 6 km jusqu'en Espagne (Derré, 1973). La cartographie thermique RSCM réalisée a permis de préciser la localisation et la géométrie d'intrusions sub-affleurantes au sein de cette auréole (figure 197) et s'est révélé être un excellent outil d'exploration minière pour les minéralisations liées au magmatisme.

Les observations de terrain réalisées au niveau de la mine de Salau montrent qu'il existe deux types de minéralisations distinctes parmi les indices rencontrés régionalement. Ces minéralisations montrent des géométries, une minéralogie et une richesse différentes. Elles se manifestent au sein de différents corps minéralisés et dépendent de la nature de la roche encaissante et de sa proximité à la faille Véronique.

- La minéralisation de type skarn : elle correspond aux corps minéralisés du **Bois d'Anglade**, essentiellement constitués de skarns (formé aux dépens des calcaires inférieurs) et de skarnoïdes (formé aux dépens des Barréiennes), situés dans des golfes formés par la géométrie complexe de la granodiorite avec son encaissant. Ils sont constitués de silicates calciques (grenat, hédénbergite), de scheelite fine peu fréquente et de quelques sulfures disséminés (arsénopyrite losangique, pyrrhotite). Les analyses géochimiques montrent des teneurs généralement inférieures à 0,5 % WO_3 et frôlant le seuil de détection pour l'or (0,1 g/t).
- La minéralisation de type brèche filonienne : elle est associée aux corps minéralisés situés sur la trajectoire de la **faille Véronique**, de direction E-W 70°N, (Quartier Véronique, Formation Sud, colonne SC), ne présentent pas de silicates calciques et ne peuvent en aucun cas s'apparenter à des skarns *sensu stricto* (Meinert *et al.*, 2005). Ils sont principalement constitués de sulfures massifs à scheelite grossière abondante sous forme d'imprégnation ou en ciment d'une brèche filonienne. Les critères de terrain montrent que cette minéralisation est nettement postérieure aux skarns, puisqu'elle recoupe à la fois la granodiorite, l'encaissant carbonaté et les skarns. Les teneurs en tungstène et en or associé à ce type de minéralisation sont fortes (> 0,8 % WO_3 et 5-10 g/t or) et étroitement corrélées avec la présence de sulfures massifs.

Un contraste évident de nature entre ces deux types de corps minéralisés apparaissait déjà à cette échelle. Le même type de relations a été observé sur l'indice d'Aurenère où coexistent un skarn et une minéralisation à sulfures massifs localisée le long de failles N120°E.

La **modélisation 3D** de l'ensemble des sondages de l'exploitation (833 sondages et 2370 rainurages) a permis de montrer que deux compartiments de skarnoïdes du quartier Véronique (aux niveaux 1450 et 1230) étaient tronçonnés par la faille selon une cinématique dextre inverse avec un rejeu de plus de 200 m. Cette cinématique et ce rejeu, observés en mine, sont cohérents avec le modèle 3D. Les critères cinématiques se manifestent sur le terrain par des skarns cisailés, des plis d'entraînement dans les marbres, des fentes de tension sub-horizontales à quartz-calcite-chlorite ainsi que des lambeaux de granodiorite bréchifiée. Les extensions des corps minéralisés constitués de skarnoïdes dans la partie supérieure de Véronique, au nord de la faille, se trouvent donc, en aval, au sud de la faille vers le nord-ouest. Les derniers sondages d'exploration réalisés corroborent parfaitement ce résultat.

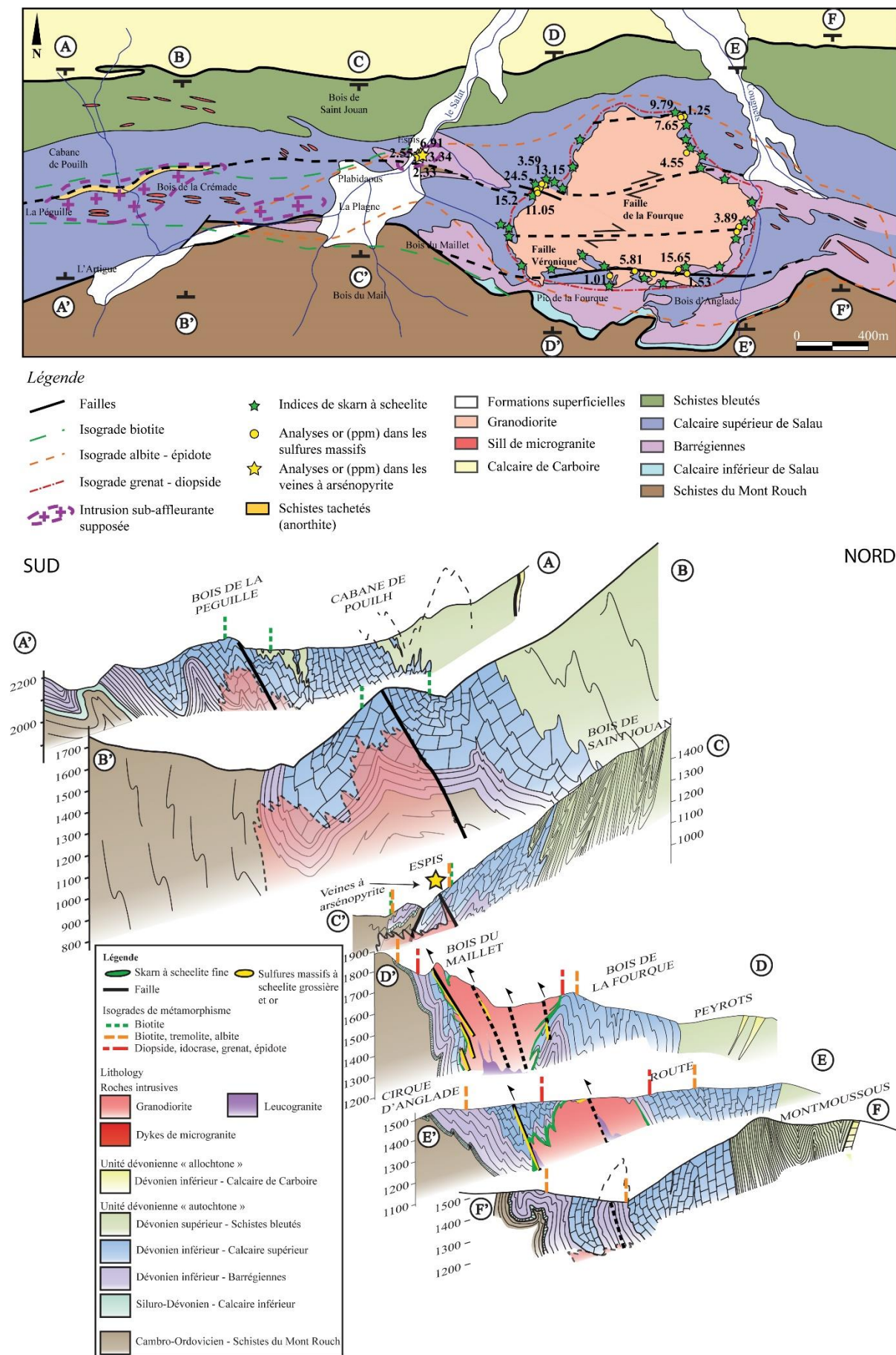


Figure 197 : Carte géologique du secteur du massif de la Fourque, montrant la distribution des principales minéralisations et de la localisation des intrusions sub-affleurantes déterminée à partir des résultats raman. Les profils des coupes A à F sont reportés sur la carte

La faille Véronique se raccorde régionalement à des couloirs cisailants d'ampleur plurikilométrique décrits à travers l'ensemble de la Zone axiale (Cochelin *et al.*, 2018). Cependant, nous avons vu, qu'en dehors du secteur de la mine, la faille ne comportait plus de minéralisation à sulfures massifs et scheelite grossière. Ainsi, en s'éloignant de l'intrusion de la Fourque, l'extension de la faille Véronique se traduit seulement par une brèche pyriteuse stérile. Cette observation majeure montre que la minéralisation n'est pas seulement contrôlée par les failles régionales N90°E mais aussi par la proximité de l'intrusion.

Au niveau du gisement de Salau, nous avons vu que les sulfures massifs étaient étroitement liés à des dykes d'aplite et des filonnets de quartz noir à tourmaline recoupant la granodiorite de la Fourque. En outre, la transition latérale entre cette minéralisation et ces dykes et filonnets est très progressive et semble même continue. Ces derniers sont plus intensément concentrés dans les niveaux inférieurs du gisement de Salau et à proximité de la faille Véronique où ils peuvent former des essaims. Sur ces critères, nous les interprétons comme constituant la partie apicale d'une seconde intrusion, plus différenciée et sous-jacente à la granodiorite de la Fourque. De telles relations entre dykes aplitiques et minéralisation sulfurée ont été décrites au Canada (Cantung, Rasmussen, 2004 ; Rasmussen *et al.*, 2011) et en Russie (Lermontovskoe, Soloviev *et al.*, 2017a ; Vostok-2, Soloviev *et al.*, 2017b ; Skrytoe, Soloviev *et al.*, 2017c). La comparaison entre les relations observées à Salau et à Cantung permet de mieux apprécier leur étroite similarité (figure 198).

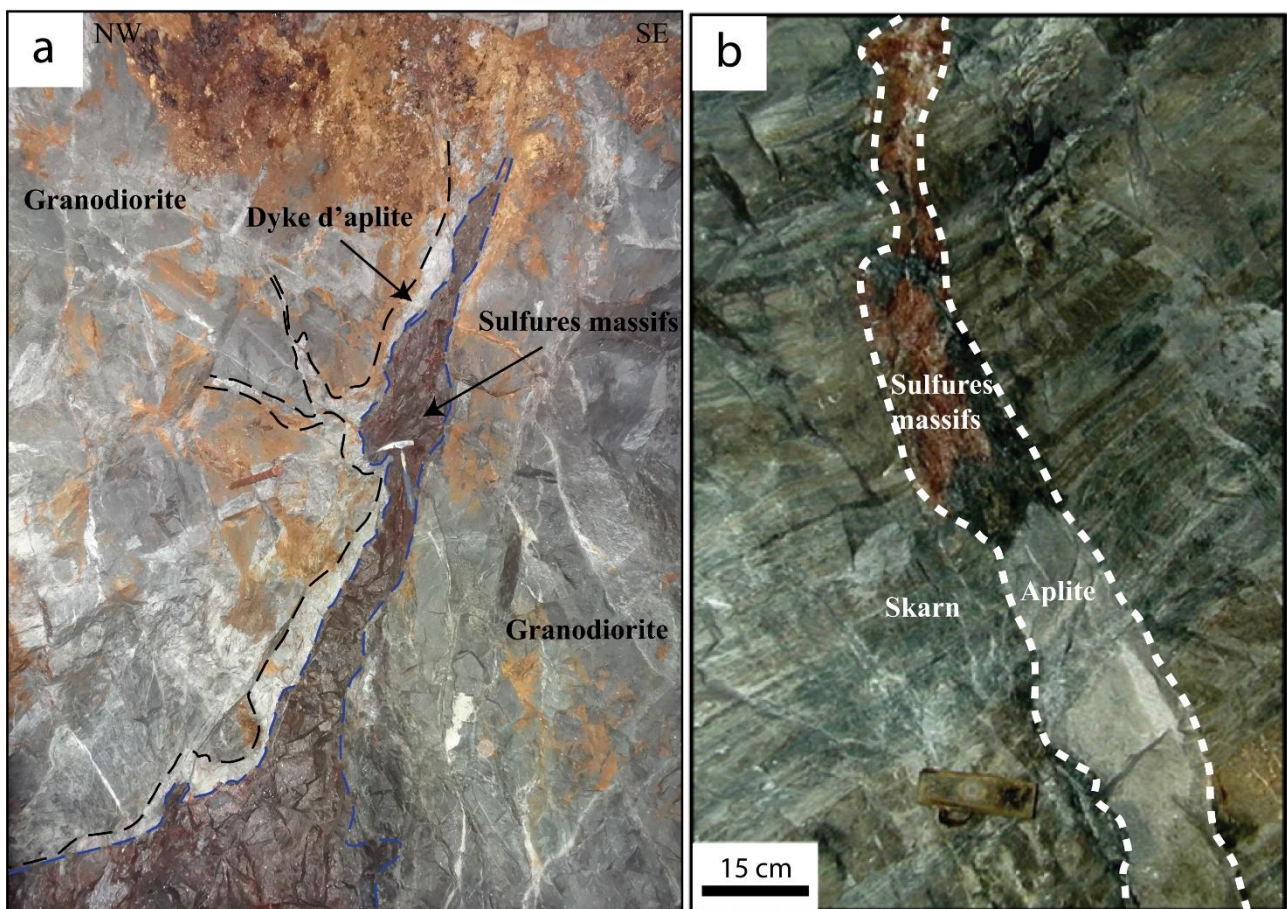


Figure 198 : Comparaison entre les dykes d'aplite et la minéralisation à sulfures massifs (a) de Salau et (b) de Cantung (modifié d'après Rasmussen *et al.*, 2011).