



Rapport d'Analyse Stratégique de Thesauros Temporis et Optimisation des Prompts IA

Section 1 : Introduction et Contexte

Thesauros Temporis constitue un projet multidisciplinaire visant à établir une cartographie temporelle et spatiale des savoirs accumulés par la Terre. L'objectif est de superposer des données géologiques, paléoclimatiques, hydrologiques, archéologiques et culturelles pour identifier des motifs récurrents et des axes structurants à travers l'histoire.

Le projet nécessite une approche rigoureuse pour la visualisation et l'exploitation des données. La génération d'images par IA est ici un outil critique, permettant de transformer des données complexes en représentations claires et précises. La qualité des prompts et leur architecture conditionnent directement la fidélité et la cohérence des résultats visuels.

Ce rapport formalise notre approche, en se basant sur les principes avancés de l'ingénierie de prompts, tout en intégrant les enseignements de l'analyse indépendante effectuée par Gemini.

Section 2 : Mandat Analytique

Le mandat consiste à produire une méthodologie opérationnelle et reproductible pour la génération d'images IA :

1. **Établir une Architecture de Prompt Design (PAD)** : standardiser la séquence et la structure des prompts.
2. **Garantir la prédictibilité et l'efficacité** : réduire la variance stochastique et optimiser l'utilisation des jetons.
3. **Contrôler la fidélité conceptuelle et stylistique** : éviter les artefacts, le saignement sémantique et stylistique.
4. **Intégrer des pratiques éthiques et légales** : assurer la conformité avec les droits de propriété intellectuelle et la neutralité des biais latents.

L'approche proposée ne vise pas à critiquer Gemini, mais à établir une méthodologie parallèle et complémentaire, mettant en avant la précision et la rigueur scientifique.



Section 3 : Hiérarchie Canonique du Prompt (CPH)

La CPH formalise la structure séquentielle et hiérarchique du prompt, garantissant un contrôle maximal :

1. **Définition du Sujet Principal (CSD)** : décrit l'entité, l'action et l'état principal. Pondération maximale.
2. **Vecteurs Stylistiques Primaires (PSVS)** : médium, technique de rendu, esthétique dominante. Pondération élevée.
3. **Modificateurs Contextuels et Environnementaux (CEM)** : lumière, géométrie, atmosphère. Pondération moyenne.
4. **Directives Techniques (TD)** : résolution, rapport d'aspect, contrôle moteur. Pondération faible.

Chaque composant est séparé par des délimiteurs syntaxiques stricts (virgules, doubles virgules, barres verticales) afin de prévenir le saignement sémantique et de guider le mécanisme d'attention du modèle.

Section 4 : Économie de Jetons et Ratio d'Efficacité

L'efficacité lexicale est cruciale. Chaque jeton doit avoir un impact maximal :

- **Compression sémantique** : remplacer des phrases longues par des termes techniques précis (ex. : « Impasto, peinture à l'huile » au lieu de « peinture à l'huile avec texture rugueuse »).
- **Évaluation quantitative** : utiliser le **Token Efficiency Ratio (TER)** pour mesurer la densité sémantique par jeton.
- **Optimisation** : réduire les jetons redondants tout en maintenant l'Indice de Cohérence (CI).

Cette approche garantit un usage optimal des ressources computationnelles et une meilleure prévisibilité des résultats.



Section 5 : Contrôles Techniques et Espace Latent

L'ingénierie avancée des prompts inclut :

1. **Pondération des concepts** : influence directe sur la trajectoire de diffusion dans l'espace latent.
2. **Prompts négatifs (NPE)** : zones d'évitement pour les artefacts, les éléments indésirables et les erreurs stylistiques.
 - Atténuation des artefacts
 - Exclusion conceptuelle
 - Pilotage esthétique
3. **Spécifications géométriques** : résolution et rapport d'aspect influencent la composition, la mise au point et la centration.

L'objectif est de maîtriser l'orientation de la diffusion afin de produire une image fidèle et exempte de biais indésirables.

Section 6 : Matrice Vectorielle Stylistique (SVM)

Le PSVS est structuré en quatre vecteurs indépendants :

1. **Médium/Matériau** : peinture à l'huile, rendu numérique, macrophotographie.
2. **Éclairage/Atmosphère** : clair-obscur, golden hour, volumétrique.
3. **Caméra/Objectif** : bokeh, profondeur de champ, objectif 85mm.
4. **Post-traitement/Filtres** : HDR, cinématique, détails extrêmes.

Chaque vecteur est pondéré et positionné pour éviter le saignement stylistique et maximiser la fidélité au concept demandé.



Section 7 : Gestion des Biais et Déviation Latente (LBD)

- Les modèles sont statistiquement biaisés par les données d'entraînement.
- Les prompts doivent être formulés pour contrer ces biais et obtenir une **Latent Bias Deviation (LBD)** élevée.
- Les « puits de gravité » dans l'espace latent attirent la diffusion vers des représentations fréquentes ; des poids et prompts négatifs doivent être appliqués pour orienter correctement la génération.

Section 8 : Intégration Multimodale

- **I2I** : images initiales comme ancrage structurel, réduisant le besoin de jetons descriptifs.
- **ControlNet** : cartes de pose, de profondeur, ou de segmentations pour contraindre géométrie et composition.

Cette séparation permet un contrôle précis de la structure et du style, garantissant cohérence et précision dans la sortie finale.

Section 9 : Propriété Intellectuelle et Éthique

- Privilégier des techniques abstraites ou domaine public plutôt que des artistes protégés.
- Documenter toutes les références pour audit et conformité.
- Assurer que les prompts n'enfreignent pas les droits et restent adaptables aux évolutions des modèles.

Section 10 : Mise en œuvre et Protocoles

Pipeline opérationnel en 6 étapes :

1. Définir les objectifs CI et LBD.
2. Rédiger le CSD en optimisant la densité sémantique.
3. Intégrer les vecteurs SVM et pondérer les composantes stylistiques.
4. Ajuster la pondération du CSD et PSVS pour guider la diffusion.
5. Appliquer l'Ensemble de Prompts Négatifs (NPS) pour atténuer artefacts et biais.



6. Finaliser les directives techniques : résolution, RA, entrées multimodales.

Évaluation : les métriques TER, CI et LBD sont utilisées pour mesurer la qualité et la cohérence de chaque image générée.

Documentation et validation :

- Standardiser la bibliothèque de prompts pour traçabilité et reproductibilité.
- Mettre en place des tests réguliers pour valider la compatibilité avec les nouvelles versions des modèles.

Conclusion

Notre analyse formalise un système d'ingénierie de prompt précis et professionnel, offrant :

- Contrôle maximal de la sortie IA.
- Optimisation des ressources et efficacité lexicale.
- Prévention des artefacts et du saignement stylistique.
- Conformité éthique et légale.

En présentant ce rapport aux décideurs financiers et scientifiques, nous démontrons la rigueur de notre méthodologie et la robustesse de notre approche pour la création d'images par IA. Les principes de structuration, de pondération et de contrôle des biais latents assurent non seulement la précision des résultats mais aussi leur reproductibilité, éléments essentiels pour tout projet de grande envergure.



Pierre Salies-Casaux
Coordinateur — Thesauros Temporis

✉ pierre@thesaurostemporis.com

🌐 <https://thesaurostemporis.com>

Google Gemini

rapport

20/11/2025

Plan d'Action et Développements pour la Création de la Bibliothèque Mondiale de Calques Temporels Interopérables (Thesaurus Temporis)

Introduction : De la Charte Scientifique à l'Infrastructure 4D

Le projet *Thesaurus Temporis* vise à établir une cartographie scientifique de la mémoire terrestre, transformant les données géologiques, paléoclimatiques, hydrologiques et anthropiques en des "calques temporels interopérables" rigoureusement corrigés.¹ L'objectif principal est d'offrir aux chercheurs, aux institutions et aux citoyens une vision continue et stratigraphique du passé, s'étendant jusqu'à la limite maximale exploitable des traces humaines, fixée à 500 000 ans avant le présent (BP).¹

Ce rapport technique et stratégique détaille l'ensemble des actions et développements nécessaires pour concrétiser cette ambition. La réalisation du projet repose sur cinq piliers fondamentaux : l'établissement de protocoles scientifiques inébranlables, le développement d'un moteur de correction spatio-temporelle de haute précision, le déploiement d'une architecture SIG 4D (spatiotemporelle en temps profond) robuste et infonuagique, la conception d'une interface d'analyse interactive, et l'établissement d'une gouvernance d'ouverture et de pérennité.

I. Alignement Méthodologique et Définition du Cadre Scientifique (Thesauros Principia)

L'intégrité du projet *Thesauros Temporis* repose sur l'adhérence stricte au dogme méthodologique de la non-spéculation : « Chaque calque repose sur des données mesurables ».¹ Cette section formalise les exigences d'ingestion et de calibration des données sources.

1.1. Fondation Scientifique : La Limite des 500 000 Ans BP et l'Horizon Stratigraphique

La charte fondatrice fixe l'exploration anthropique à 500 000 ans BP, correspondant à l'apparition d'espèces humaines maîtrisant le feu et l'espace (*Homo erectus*, *heidelbergensis*).¹ Cette borne est choisie par cohérence géologique, car la Terre conserve encore une mémoire physique exploitable dans les couches sédimentaires non métamorphisées.¹

Il est essentiel de noter une distinction technique majeure : bien que l'horizon d'exploration des traces humaines organisées soit de 500 000 ans, les couches sédimentaires qui conservent les isotopes stables, les pollens fossiles et les dépôts alluviaux restent lisibles jusqu'à environ 2 millions d'années (Ma).¹ Par conséquent, l'infrastructure technique du SIG 4D doit être conçue pour indexer et gérer des données allant jusqu'à 2 Ma, anticipant ainsi l'intégration de calques géologiques et paléoclimatiques plus profonds. Cette capacité technique plus large permettrait une extension future du cadre anthropique si de nouvelles preuves d'organisations humaines antérieures étaient détectées. L'architecture ne doit donc pas être rigide et contrainte par la borne de 500 000 ans BP, garantissant ainsi l'évolutivité du système.

1.2. Protocoles d'Acquisition, de Calibration et de Normalisation des Données Sources

L'interopérabilité des calques stratigraphiques exige une harmonisation des données provenant de sources géospatiales et paléoscientifiques très diverses.

1.2.1. Normalisation des Proxies Paléoclimatiques

Le projet intègre des modèles paléoclimatiques (NASA, PAGES2K) et des datations croisées.¹ Le National Centers for Environmental Information (NCEI) de la NOAA est le principal dépositaire mondial des données de paléoclimatologie, issues de

proxies tels que les carottes de glace, les sédiments océaniques et lacustres, et les spéléothèmes.² Ces données sont accessibles via des APIs en format JSON ou XML.⁴

Le défi réside dans la gestion de la résolution temporelle. Les reconstitutions climatiques de référence, telles que celles du réseau PAGES2K, se concentrent souvent sur des périodes relativement récentes (par exemple, 1950 à -62 BP pour certaines études ⁶). Pour fournir la « vision continue du passé » sur 500 000 ans, un protocole d'intégration et de lissage doit être mis en place, permettant la transition entre des résolutions haute fréquence (annuelles ou décennales dans l'Holocène récent) et des résolutions millénaires requises pour les périodes plus anciennes du Pléistocène. Une action prioritaire est la mise en œuvre de la méthode multi-proxy et l'utilisation systématique des sites instrumentés nationaux (Zones Ateliers, SNO) pour la calibration des traceurs, ce qui est essentiel pour renforcer la fiabilité des reconstructions paléo-environnementales.⁸

1.2.2. Standardisation Géophysique et Modèles de Terrain

Le calque de base est le modèle numérique de terrain global actuel, intégrant les données bathymétriques (GEBCO, Copernicus).¹ Le modèle GEBCO_2025 fournit une grille d'élévation à 15 arc-second.⁹

La création de calques paléo-environnementaux est un processus de dérivation de second ordre. Pour chaque tranche temporelle (T), le modèle de terrain actuel doit être corrigé par des modèles glacio-eustatiques (niveau marin global) et des modèles isostatiques (rebond terrestre post-glaciaire et subsidence régionale). Ce traitement permet de reconstituer les paysages passés, y compris les paléolacs et les dépôts alluviaux.¹ Ce processus de dérivation, étant une interpolation géostatistique, doit impérativement être accompagné d'une estimation de l'imprécision, telle que la variance de krigeage ¹¹, pour garantir la traçabilité scientifique de la non-spéculation.

1.2.3. Formalisation des Datations Croisées et Quantification de l'Incertitude

Les datations archéologiques et géologiques utilisent des méthodes croisées (C14, OSL, isotopes).¹ Un point de blocage reconnu par la communauté paléoscientifique est le manque de ressources pour effectuer la datation de manière systématique, ce qui limite l'accumulation de données fiables.⁸

Il est donc impératif de soutenir la coordination nationale et l'allocation de ressources dédiées aux plateformes de datation. Chaque datation intégrée doit être formalisée non pas comme un point temporel unique, mais comme un intervalle de validité, défini par une imprécision mesurable (écart-type σ_T).¹¹

La table suivante récapitule les exigences de normalisation pour les principaux types de données.

Matrice des Données Sources et Exigences de Normalisation

Type de Calque	Source(s) Requise(s)	Profondeur Temporelle Maximale	Format d'Interopérabilité Cible	Problématique d'Intégration/Traitement
Bathymétrie/ Terrain	GEBCO, Copernicus, LiDAR ⁹	Actuel (0 BP)	GRD/ GeoTIFF/3D Tiles	Reconstruction paléo-environnementale (eustasie/isostasie)
Paléoclimatologie	NOAA/ PAGES2K, NASA (Modèles) ²	0 – 500 000 ans BP	Time Series / JSON/XML API ⁴	Calibration des proxies, lissage des résolutions temporelles
Géochronologie (Datations)	C14, OSL, Isotopes ¹	0 – 500 000 ans BP	Point/Série Temporelle (M)	Quantification et indexation de l'incertitude de datation (σ)
Anthropique (Vestiges)	Imagerie satellitaire, LiDAR ¹	< 500 000 ans BP	Vecteur (Point/ Polygone 4D)	Correction spatiale absolue via modèle tectonique

1.3. Métadonnées Stratigraphiques et Qualité des Données (QC/QA)

La transparence et la vérifiabilité des données nécessitent une documentation exhaustive de l'incertitude.¹ L'approche doit intégrer deux dimensions de l'erreur : l'imprécision des données d'entrée (erreur de mesure) et l'incertitude liée à l'interprétation ou à l'interpolation.¹¹

La propagation de l'incertitude spatiale peut être gérée par des méthodes de carroyage ou de tessellation, qui consistent à découper l'espace géographique en mailles pour y propager l'information et son degré de fiabilité.¹³ Pour les données interpolées ou dérivées (comme la paléo-bathymétrie), la variance de krigeage doit

systematiquement accompagner les résultats cartographiques, indiquant clairement la fiabilité du diagnostic sur chaque maille.¹¹

II. Développement du Moteur de Correction Spatio-Temporelle 4D

La correction spatio-temporelle des coordonnées est le cœur méthodologique de *Thesauros Temporis*. Elle garantit que les vestiges anthropiques et les phénomènes naturels sont positionnés avec une cohérence géographique pour l'époque étudiée.¹

2.1. Modélisation de la Dérive Tectonique Profonde (Deep-Time Kinematic Modeling)

2.1.1. Sélection et Intégration des Modèles Plaque-Tectoniques

Toute mesure doit spécifier sa plaque tectonique, son référentiel (WGS84, ETRS89, NAD83) et sa marge d'erreur.¹ La correction exige l'intégration de modèles cinématiques de plaques pour inverser la dérive géologique. Par exemple, sur 10 000 ans, la dérive de la plaque eurasiatique est d'environ $1,2 \sim \text{cm/an}$, entraînant un déplacement de 120 mètres.¹

L'utilisation d'outils de modélisation tectonique profonds, tels que GPlates ou ses interfaces programmables (PyGPlates, GPlates Web Service), est indispensable.¹⁴ Ces plateformes permettent de manipuler les reconstructions paléogéographiques à travers le temps géologique en utilisant des modèles établis, comme ZAHIROVIC2022 ou CAO2024, qui couvrent de vastes échelles de temps.¹⁵ Pour chaque entité spatiale datée, le moteur doit appliquer le protocole suivant : identifier la plaque, interroger le modèle cinématique pour l'âge T (jusqu'à 500 000 ans BP), et calculer la rotation inverse pour obtenir les coordonnées d'origine (paléo-coordonnées).

2.1.2. Gestion des Référentiels et Propagation d'Erreur Spatiale

Le déplacement absolu d'un point historique sur la Terre doit être enregistré comme un Volume d'Incertitude Spatio-Temporelle (STUV). L'erreur spatiale totale d'un point historique (par exemple, un foyer ou un campement ¹) est composée de deux sources d'incertitude cumulatives.

Premièrement, l'imprécision initiale de la mesure archéologique, estimée entre ± 50 et ± 250 m selon l'époque et la méthode d'acquisition.¹ Deuxièmement, l'erreur intrinsèque associée à la reconstruction cinématique des plaques. Même les modèles sophistiqués comme ceux utilisés dans GPlates comportent une incertitude, particulièrement aux limites des plaques ou sur des échelles de temps très longues.¹⁶ Un modèle d'erreur stochastique doit être développé pour propager ces deux composantes d'incertitude dans l'espace reconstruit. L'erreur spatiale accumulée est directement proportionnelle à l'âge T du vestige et aux taux d'erreurs cinématiques.

Le tableau ci-dessous précise les paramètres de ce moteur de correction.

Cadre de Correction Tectonique et d'Incertitude Spatiale

Paramètre de Correction	Unité/Référence	Exigence Charte/ Source	Impact sur l'Incertitude (STUV)
Référentiel Géodésique	WGS84, ETRS89, NAD83	Précisé par mesure ¹	Nécessite des transformations de coordonnées précises
Vitesse de Dérive Tectonique	cm/an	1.2 à $2.5 \sim \text{cm/an}$ ¹	Contribue à la marge d'erreur accumulée ($\pm 50\text{-}250 \sim \text{m}$)
Modèle Cinématique Utilisé	ZAHIROVIC2022 ou CAO2024 ¹⁵	Spécifié et immuable par version de données	Source de l'erreur cinématique (doit être documentée)
Âge Cible	Années BP	0 à $500\,000$ ans BP	Multiplicateur direct de l'erreur spatiale accumulée

2.2. Quantification et Indexation de l'Incertitude Géochronologique

L'objet de données de base de *Thesauros Temporis* n'est pas un point (X, Y, Z, T), mais un **Volume d'Incertitude Spatio-Temporelle (STUV)**, qui englobe les dimensions spatiales et chronologiques de l'erreur (σ_{XYZ} et σ_T).

L'indexation de ce volume est fondamentale pour réaliser le but du projet : démontrer la cohérence temporelle entre sites.¹ Si le système indexait uniquement les coordonnées moyennes (X, Y, Z) et l'âge moyen ($T \pm \sigma_T$), des sites sans lien réel (car les marges d'erreur ne se chevauchent pas) pourraient être faussement considérés comme contemporains.

En indexant l'intervalle de confiance ($T \pm \sigma_T$), le système permet des requêtes de niveau supérieur destinées aux chercheurs. Par exemple, il devient possible de chercher des "vestiges anthropiques qui démontrent une cohérence temporelle significative (chevauchement du STUV) avec un événement paléoclimatique (rupture environnementale ou paléolac) avec une probabilité statistique $p > 90\%$." L'incertitude n'est donc pas seulement une description, mais un puissant filtre analytique qui garantit la rigueur scientifique du concept de temps stratigraphique.

III. Conception et Déploiement de l'Architecture SIG 4D Cloud-Native

Pour gérer le volume massif de données spatio-temporelles sur un demi-million d'années et assurer l'interopérabilité mondiale, une architecture infonuagique et un Système d'Information Géographique (SIG) 4D performant sont requis.

3.1. Choix de la Base de Données et Optimisation de l'Indexation Spatio-Temporelle

3.1.1. Implémentation de PostGIS pour les Géométries 4D

PostgreSQL avec l'extension PostGIS est la solution technique privilégiée en raison de sa robustesse et de sa conformité avec les standards OGC (Open Geospatial Consortium).¹⁷ PostGIS supporte nativement les coordonnées de haute dimensionnalité, où l'ordonnée M est utilisée pour représenter une "mesure" qui, dans le cadre de la paléogéographie, est l'âge (le temps).¹⁷ Le modèle de données doit utiliser systématiquement le type $\text{Geometry}(X, Y, Z, M)$ pour stocker les points datés (datations, vestiges) et les primitives stratigraphiques.

3.1.2. Stratégie d'Indexation R-Tree sur GiST pour la performance 4D

L'indexation spatiale est critique pour la performance des requêtes SIG sur des ensembles de données volumineux.¹⁸ PostGIS utilise un R-Tree implémenté via l'accès GiST (Generalized Search Tree).²⁰ Cette méthode permet d'indexer les géométries N-D, ce qui est nécessaire pour l'indexation 4D (X, Y, T, potentiellement Z si l'élévation est également une variable de recherche).¹⁷

L'optimisation de l'indexation 4D est cruciale pour la fluidité de l'exploration stratigraphique. Les requêtes les plus courantes concerneront des "tranches stratigraphiques" (trouver tous les objets pertinents dans une zone XY donnée à un instant \$T\$). L'index GiST doit être paramétré pour optimiser simultanément la recherche sur les dimensions géographiques (XY) et sur la dimension temporelle (\$M\$). La performance de l'accès aux données doit minimiser la latence lors de la navigation dans le temps profond.

3.2. Architecture Microservices et Interopérabilité des Données

3.2.1. Développement d'APIs RESTful

Afin de réaliser l'objectif d'une bibliothèque mondiale interopérable, l'accès aux calques temporels doit être standardisé via des interfaces de programmation. L'architecture doit s'inspirer du modèle éprouvé des services de données environnementales comme ceux du NCEI de la NOAA, qui offre des APIs pour la recherche et l'accès aux données paléoclimatiques en JSON ou XML, avec des options de sous-ensembles.⁴

Le service de données *Thesauros Temporis* doit proposer des APIs RESTful permettant aux institutions et chercheurs tiers d'accéder aux calques corrigés en formats ouverts, notamment GeoJSON pour le web ²¹ et les services OGC (WFS, WMS, WCS) pour les échanges institutionnels.

3.2.2. Gestion du Volume de Stockage et Cache Temporel

L'architecture nécessite une stratégie *Cloud-Native* pour gérer le stockage distribué des rasters (MNT paléo-corrigés) et le traitement des séries temporelles.

Pour garantir une « vision continue » et une fluidité de l'exploration spatio-temporelle (le « glissement temporel »), le chargement dynamique des données brutes de PostGIS pour chaque millénaire sur 500 000 ans est trop exigeant. La solution technique réside dans une couche de cache ou de pré-tessellation temporelle. Les tranches temporelles jugées critiques (par exemple, chaque intervalle de 10 000 ans, ou les points de rupture environnementale) doivent être pré-calculées, corrigées par le moteur tectonique, et stockées en formats optimisés pour le streaming web et la visualisation 3D, tels que les Tuiles 3D (3D Tiles).²² Cela permet de basculer instantanément entre les calques sans recalcul à la demande.

Le tableau ci-dessous présente la pile technique retenue pour l'architecture 4D.

Architecture SIG 4D : Stack Technique et Fonctionnalités

Couche	Technologie Cible	Fonctionnalité SIG 4D	Rôle pour Thesauros Temporis
Base de Données	PostgreSQL/ PostGIS (GiST R-Tree N-D) ¹⁷	Stockage et Indexation \$Geometry(X, Y, Z, M)\$	Moteur de recherche stratigraphique haute performance
Moteur de Correction	PyGPlates / GPlates Web Service ¹⁴	Rétro-correction cinématique	Garant de la cohérence spatiale historique
API/Service	RESTful APIs (Modèle NCEI) ⁴ , OGC WFS	Interopérabilité, sous-ensemble de données	Accès universel et programmé aux calques
Visualisation	CesiumJS / 3D Tiles / WebGL ²²	Rendu 3D/4D performant	Interface utilisateur pour l'exploration

IV. Développement de l'Interface de Visualisation Stratigraphique et Interactive

L'interface est le point d'accès pour l'exploration du passé et la démonstration de la cohérence temporelle des sites méconnus.¹

4.1. Conception du Moteur de Rendu 4D et Superposition Dynamique

Le moteur de visualisation doit être capable de représenter le globe terrestre avec une précision et une performance élevées pour le streaming de données massives (rasters et modèles de terrain).²² Le moteur CesiumJS est le standard *de facto* pour les applications géospatiales 3D.²²

L'élément central de l'interface sera le curseur temporel (ou "glissement temporel"). Lorsqu'un utilisateur sélectionne un âge T (par exemple, $-100\,000$ ans BP), le moteur de rendu doit instantanément :

1. Afficher le calque paléo-environnemental pré-calculé correspondant à T .
2. Reconstruire les géométries vectorielles (vestiges anthropiques) à leur paléoposition corrigée pour T , en appliquant la correction tectonique inversée du moteur 4D (Section II).

L'interface doit également permettre la superposition dynamique de couches d'informations (cartes géologiques, occupation des sols, modèles numériques de terrain) avec des contrôles de transparence, reproduisant le principe d'un logiciel SIG pour une lecture véritablement stratigraphique du temps.²¹

4.2. Outils d'Analyse et de Valorisation des Sites Méconnus

4.2.1. Fonctionnalité de Cohérence Temporelle Absolue

Pour aider les chercheurs à mettre en valeur les sites méconnus et à démontrer leur cohérence temporelle ¹, le système doit intégrer un outil d'analyse spatio-temporelle quantitative.

Cet outil permettra de sélectionner deux ou plusieurs entités historiques (par exemple, un foyer daté C14 et un axe d'échange suggéré par des outils lithiques) et de déterminer la probabilité de leur contemporanéité. Cette analyse s'effectuera en calculant le chevauchement statistique de leurs Volumes d'Incertitude Spatio-Temporelle (STUV), intégrant les marges d'erreur spatiales et chronologiques (σ_{XYZ} et σ_T).

Crucialement, l'interface doit garantir la traçabilité complète des données. En cliquant sur un objet reconstruit, l'utilisateur doit accéder à une fiche de métadonnées détaillant le chemin de transformation : de la donnée source (position GPS actuelle, âge mesuré), à la quantification de son incertitude, à la correction cinématique appliquée (modèle tectonique utilisé), jusqu'à sa position finale corrigée. Cette transparence est la seule manière de satisfaire le principe de vérifiabilité absolue du projet.¹

4.2.2. Interfaces Utilisateur Spécialisées et Rôle Sociétal

Afin de servir les objectifs variés du projet — recherche, institution et citoyen — deux modes d'interface doivent être développés :

1. **Interface Chercheur** : Accès aux APIs de données brutes, aux outils de calcul de chevauchement STUV, et à la visualisation des couches d'incertitude (σ).
2. **Interface Citoyen/Valorisation** : Se concentre sur la mise en récit (story mapping) de la cohérence temporelle des sites, utilisant les résultats validés de l'analyse STUV pour créer des narratifs non linéaires, mais stratigraphiques.¹

En fournissant une vision continue du passé et en corrélant les traces humaines avec les ruptures environnementales anciennes (par exemple, les variations paléoclimatiques fournies par NOAA/PAGES2K²), *Thesauros Temporis* acquiert un rôle sociétal dépassant la simple archive. Les recherches en paléo-environnements fournissent des éclairages essentiels pour les synthèses du GIEC et pour mieux anticiper l'évolution future du climat.⁸ Le projet contribue à la relecture du temps humain en montrant comment les sociétés passées ont réagi aux changements climatiques rapides, offrant ainsi des pistes pour comprendre la résilience humaine face aux risques environnementaux actuels.

V. Gouvernance, Pérennité et Modèle d'Ouverture (Thesauros Lex)

La pérennité et l'impact mondial du projet dépendent de son cadre juridique et institutionnel, qui doit être aligné sur l'objectif d'accessibilité universelle.

5.1. Cadre Juridique des Données et Licence d'Accès Universel

L'impératif de créer une « bibliothèque mondiale de calques temporels interopérables, accessible à tous » ¹ exige l'adoption d'une licence de données ouverte pour l'ensemble des calques générés.

La recommandation principale est d'adopter l'**Open Database License (ODbL) v.1.0**.²⁵ Cette licence est reconnue dans le réseau Open Knowledge et impose que les œuvres dérivées (les "Bases de données dérivées") adoptent une licence comparable. Étant donné que les calques *Thesauros Temporis* sont le résultat d'une transformation profonde (correction tectonique, interpolation, agrégation de multiples sources) des données d'entrée (GEBCO, NOAA), elles peuvent être classées comme des œuvres dérivées. L'ODbL garantit ainsi l'effet de réciprocité, assurant que toute réutilisation substantielle des travaux enrichis contribue en retour au patrimoine commun.

Une revue légale est indispensable pour garantir la compatibilité entre l'ODbL et les termes d'utilisation des sources primaires (GEBCO, NOAA).¹⁰

5.2. Organisation Institutionnelle et Partenariats Stratégiques

La nature interdisciplinaire et mondiale du projet nécessite un modèle de gouvernance collaborative. Le projet doit fonctionner comme un "tiers de confiance" ²⁶ fédérant les institutions de recherche (BRGM, CNRS/INSU), les agences de données (NOAA/NCEI, NASA), et les contributeurs de données géospatiales (ex: communautés SIG régionales ²⁶).

Des partenariats formels sont requis pour garantir un accès continu et la mise à jour des modèles fondamentaux :

1. **Modèles Tectoniques** : Accords avec des groupes de recherche tels qu'EarthByte, qui maintiennent les modèles cinématiques utilisés par GPLates ¹⁴, pour intégrer les nouvelles versions de rotation des plaques.
2. **Données de Référence** : Collaboration avec le World Data Service for Paleoclimatology (NCEI) pour l'intégration continue des nouveaux jeux de données de proxies.²

5.3. Plan Opérationnel et Feuille de Route d'Implémentation

La réalisation du projet s'articule en trois phases :

1. **Phase I (Fondation Architecturale et Correction)** : Mise en place du socle technique.

- Déploiement du stack PostgreSQL/PostGIS avec indexation GiST N-D.
 - Intégration du moteur de correction PyGPlates et finalisation du protocole de propagation d'erreur STUV (Section II).
 - Définition et test des pipelines d'ingestion et de normalisation des données sources (Matrice I.2).
- 2. Phase II (Prototype 4D et APIs) :** Construction des services et de l'interface.
- Développement des APIs RESTful selon le modèle NCEI.⁴
 - Mise en place de la couche de pré-tessellation temporelle et du stockage 3D Tiles pour les tranches critiques.
 - Développement de l'interface CesiumJS et de la fonctionnalité de glissement temporel.
 - Prototype d'analyse de cohérence temporelle (chevauchement STUV) sur une zone pilote.
- 3. Phase III (Échelle Globale et Ouverture) :** Production et lancement.
- Ingestion massive et QA/QC de l'ensemble des données ciblées sur la période \$0-500 000\$ ans BP.
 - Validation finale du cadre juridique et adoption de la licence ODbL.
 - Lancement public de la plateforme en tant que bibliothèque mondiale interopérable, en se concentrant sur la mise en valeur des sites par leur cohérence stratigraphique.

Conclusion et Recommandations

La concrétisation de *Thesauros Temporis* exige une approche interdisciplinaire et une ingénierie SIG 4D de pointe. Le projet ne se contente pas d'archiver le passé, mais utilise la technologie pour lui conférer une précision et une cohérence temporelle inédites.

La principale recommandation technique est d'indexer l'intégralité des données en tant que Volumes d'Incertitude Spatio-Temporelle (STUV), garantissant que toute analyse de « cohérence temporelle » soit basée sur des critères statistiques de chevauchement d'erreur, et non sur de simples coïncidences de coordonnées moyennes.

L'investissement dans la gouvernance ouverte et l'adoption d'une licence ODbL sont critiques pour atteindre l'objectif de bibliothèque mondiale. Enfin, la pérennité scientifique dépendra de la capacité du projet à accélérer la collecte de données primaires en soutenant activement les plateformes de datation, identifiées comme un goulot d'étranglement majeur dans les paléosciences.⁸

Thesauros Temporis est positionné pour devenir la référence mondiale en matière de cartographie du temps profond, offrant un outil puissant pour la recherche fondamentale et la sensibilisation aux enjeux de la mémoire terrestre face aux défis climatiques et environnementaux contemporains.

Sources des citations

1. document pdf en français.pdf
2. Paleoclimatology | National Centers for Environmental Information (NCEI) - NOAA, consulté le novembre 20, 2025, <https://www.ncei.noaa.gov/products/paleoclimatology>
3. Paleoceanography | National Centers for Environmental Information (NCEI) - NOAA, consulté le novembre 20, 2025, <https://www.ncei.noaa.gov/products/paleoclimatology/paleoceanography>
4. Paleo Data Search | API Documentation | National Centers for Environmental Information (NCEI) - NOAA, consulté le novembre 20, 2025, <https://www.ncei.noaa.gov/access/paleo-search/api>
5. Access | National Centers for Environmental Information (NCEI) - NOAA, consulté le novembre 20, 2025, <https://www.ncei.noaa.gov/access>
6. NOAA/WDS Paleoclimatology - PAGES (Past Global Changes) 2K, consulté le novembre 20, 2025, <https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=noaa-recon-12621;view=iso>
7. NOAA/WDS Paleoclimatology - PAGES2k 2,000 Year Arctic Gridded Temperature Reconstructions, consulté le novembre 20, 2025, <https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=noaa-recon-23031;view=iso>
8. LIVRE BLANC - Cnrs-Insu, consulté le novembre 20, 2025, https://www.insu.cnrs.fr/sites/institut_insou/files/news/2024-03/Livre%20Blanc%20Pal%C3%A9o_FINAL2902.pdf
9. Gridded Bathymetry Data - GEBCO, consulté le novembre 20, 2025, <https://www.gebco.net/data-products/gridded-bathymetry-data>
10. GEBCO's global gridded bathymetric data sets, consulté le novembre 20, 2025, https://www.gebco.net/sites/default/files/documents/GEBCO_grid_2024.pdf
11. Méthodologie de l'évaluation départementale du risque lié aux effondrements de cavités souterraines abandonnées - InfoTerre, consulté le novembre 20, 2025, <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-56275-FR.pdf>
12. Datations « absolues » en archéologie - Rencontres scientifiques et techniques de l'Inrap, consulté le novembre 20, 2025, https://sstinrap.hypotheses.org/files/2024/12/livret_SST8_Inrap_Datations_absolues_DIM.pdf
13. Optimisations cartographiques pour la gestion des crises et des risques majeurs - CCR, consulté le novembre 20, 2025, https://www.ccr.fr/wp-content/uploads/2025/09/3-These_Thomas-CANDELA-compresse.pdf
14. GPlates, consulté le novembre 20, 2025, <https://www.gplates.org/>

15. Plate Tectonics Models - GPlates Web Service, consulté le novembre 20, 2025, <https://gwsdoc.gplates.org/models/>
16. Global and regional plate motion models - EarthByte, consulté le novembre 20, 2025, <https://www.earthbyte.org/category/resources/data-models/global-regional-plate-motion-models/>
17. Chapter 4. Data Management - PostGIS, consulté le novembre 20, 2025, https://postgis.net/docs/using_postgis_dbmanagement.html
18. How do I use spatial indexes? - PostGIS, consulté le novembre 20, 2025, <https://postgis.net/documentation/faq/spatial-indexes/>
19. 15. Spatial Indexing — Introduction to PostGIS, consulté le novembre 20, 2025, <http://postgis.net/workshops/postgis-intro/indexing.html>
20. PostGIS R-Tree: Why does it exist when PostgreSQL already implements its R-Tree with what appears to be the same algorithm? - GIS StackExchange, consulté le novembre 20, 2025, <https://gis.stackexchange.com/questions/263370/postgis-r-tree-why-does-it-exist-when-postgresql-already-implements-its-r-tree>
21. Aperçu de l'interface cartographique interactive de visualisation des... | Download Scientific Diagram - ResearchGate, consulté le novembre 20, 2025, https://www.researchgate.net/figure/Apercu-de-linterface-cartographique-interactive-de-visualisation-des-metadonnees-sa_fig5_280315402
22. Cesium: The Platform for 3D Geospatial, consulté le novembre 20, 2025, <https://cesium.com/>
23. Visualizing Spatial Data - Cesium, consulté le novembre 20, 2025, <https://cesium.com/blog/2015/02/02/visualizing-spatial-data/>
24. Utilisation des archives naturelles pour la reconstitution du passé hydro-climatique, consulté le novembre 20, 2025, https://publications.gc.ca/collections/collection_2023/rncan-nrcan/m183-2/M183-2-8768-fra.pdf
25. Compendium des licences d'information géospatiale - UN-GGIM, consulté le novembre 20, 2025, https://ggim.un.org/documents/Compendium_des_licences_dinformation_geospatiale.pdf
26. consulté le novembre 20, 2025, https://www.ign.fr/publications-de-l-ign/institut/evenements/reponses_consultation-publique-ign-communs_juin21.ods
- 27.