

DNA _{archi}	
N° 1	20 25
Article scientifique	

Le métasigne architectural de l'intelligence artificielle

The Architectural Metasign of Artificial Intelligence

Lazaros Mavromatidis^{1,2,3}*

¹ Professeur des ENSA (HDR)

² École Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Malaquais – Paris Sciences Lettres (PSL)

³ Laboratoire Géométrie, Structure, Architecture (GSA)

Résumé : L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans l'éducation de l'architecture ouvre des horizons inédits en générant des images qui ont le potentiel de fonctionner comme des métasignes, à l'intersection de la sémiologie et des dynamiques scientifiques. S'inspirant de théories variées — de la physique à la sémiologie — cette approche vise à susciter un dialogue innovant entre les images générées par l'IA et différents cadres intellectuels, explorant leurs potentiels et leurs limites dans la pratique architecturale. Ces images ne sont pas des objets finis, mais des configurations dynamiques où l'entropie et l'exergie participent à l'exploration des possibles. L'IA, en optimisant les flux de données pour assurer la cohérence morphologique et narrative, produit des attracteurs visuels susceptibles de figer la pensée dans une standardisation. Ainsi, au-delà de la création d'images, il s'agit de questionner leur réception critique et leur capacité à générer de nouvelles narrations architecturales. Cette approche hybride, mêlant sciences physiques et sémiotiques, permet de concevoir l'IA comme un agent heuristique et dialogique, stimulant une réflexion sur les limites et la créativité dans la conception architecturale contemporaine.

Mots-clés : entropie, thermodynamique, modèle causale, équilibre, métasigne.

[Abstract : The integration of artificial intelligence (AI) into architectural education opens unprecedented horizons by generating images that have the potential to function as metasigns, at the intersection of semiology and scientific dynamics. Drawing inspiration from various theories — from physics to semiology — this approach aims to foster an innovative dialogue between AI-generated images and different intellectual frameworks, exploring both their potential and their limitations within architectural practice. These images are not finished objects but dynamic configurations where entropy and exergy contribute to the exploration of possibilities. By optimizing data flows to ensure morphological and narrative coherence, AI produces visual attractors that risk freezing thought into standardization. Thus, beyond the creation of images, the goal is to question their critical reception and their ability to generate new architectural narratives. This hybrid approach, blending physical sciences and semiotics, positions AI as a heuristic and dialogical agent, stimulating reflection on the limits and creativity in contemporary architectural design.]

Keywords : Entropy, Thermodynamics, Causal model, Equilibrium, Metasign

INTRODUCTION – VERS UNE INTELLIGENCE ARTIFICIELLE COMME META-SYSTEME D'INTERPRETATION ARCHITECTURALE

L'intégration rapide des intelligences artificielles génératives – telles que DALL-E, Midjourney ou GPT-4o – bouleverse les pratiques de conception architecturale. Ces systèmes transforment non seulement les processus de représentation, mais aussi les conditions d'émergence du sens dans l'image architecturale. Cet article propose d'interpréter les productions de l'IA comme des “*configurations sémiotiques dynamiques*”, situées à l'intersection de la physique de l'information et de la pensée architecturale.

En mobilisant la “*thermodynamique constructale*” (Bejan, 2024) et la “*modélisation causale non linéaire*” (Baciu, 2025), nous avançons l'hypothèse que les images générées peuvent être comprises comme des métasignes : des condensations formelles résultant de flux énergétiques et informationnels organisés. L'objectif est triple : (1) proposer une formalisation conceptuelle du métasigne IA ; (2) introduire une métrique d'efficacité sémiotique permettant d'évaluer la cohérence symbolique de ces artefacts ; (3) examiner les principes de la thermodynamique constructale dans leur dimension morphogénétique (Mavromatidis, 2025a; 2025b; 2024).

Si plusieurs travaux récents ont étudié le rôle de l'IA générative dans la conception architecturale (Rombach et al., 2022 ; McCormack et al., 2020 ; Zhuang et al., 2025), peu ont tenté d'en proposer une lecture intégrant simultanément des cadres physiques et sémiotiques. Les modèles de diffusion (Stable Diffusion, Midjourney) et les architectures de transformers multimodaux (DALL-E 3, GPT-4o) ont profondément modifié la relation entre texte et image, ouvrant la voie à une approche sémiotique des ontologies computationnelles.

Dans cette étude, les notions de flux, d'entropie, d'exergie et de thermodynamique constructale ne sont pas employées comme de simples métaphores, mais comme des modèles interprétatifs à double niveau : à la fois physique et computationnel. D'un point de vue physique, elles renvoient aux principes de la thermodynamique du non-équilibre, selon lesquels tout système tend à optimiser ses voies de circulation d'énergie et d'information — conformément à la loi constructale (Bejan, 2012). D'un point de vue computationnel, ces mêmes notions décrivent le comportement des modèles

génératifs comme des systèmes dissipatifs d'information : l'*entropie* traduit la diversité et la complexité des états possibles, tandis que l'*exergie* correspond à la cohérence formelle et sémantique des configurations produites. L'articulation de ces deux niveaux permet de comprendre la génération d'images architecturales par l'IA comme un processus d'auto-organisation sémiotique, où les flux informationnels sont à la fois énergétiques et symboliques. Cette approche rejoint, sur un autre plan, les recherches récentes sur les “*Chain of Thought*” (CoT) des modèles de langage (Wei et al., 2022), dans lesquelles le raisonnement est lui aussi conçu comme un flux dynamique d'états informationnels cherchant à maximiser la cohérence interne du discours généré.

Ces récents travaux sur le raisonnement symbolique des modèles de langage, notamment à travers les protocoles de *Chain of Thought* (CoT), ont mis en évidence la capacité des IA à généraliser des schémas cognitifs au-delà de leurs conditions d'entraînement. Dans ces expériences, les tâches de raisonnement — telles que la concaténation de lettres finales ou les séquences de lancers de pièces — sont construites selon un protocole strict distinguant des ensembles “*in-domain*” (exemples identiques à ceux des données d'apprentissage) et “*out-of-domain*” (OOD), dans lesquels les modèles doivent résoudre des problèmes comportant davantage d'étapes ou de variables que ceux rencontrés initialement.

Ces dispositifs expérimentaux montrent que les architectures génératives, lorsqu'elles sont correctement guidées par des exemples de raisonnement, peuvent extrapoler leurs chaînes causales à des situations inédites, illustrant ainsi une propriété de généralisation thermodynamique du raisonnement computationnel : l'IA tend à prolonger les flux de cohérence symbolique au-delà du cadre prescrit, en optimisant la continuité du sens à travers la complexité croissante des tâches.

Ainsi, sur le plan sémiotique, cette recherche s'inscrit dans la continuité des travaux de Roland Barthes (1964) sur la rhétorique de l'image, d'Umberto Eco (1968) sur la structure du signe architectural, et de Charles Jencks (1969) sur la signification des formes.

Enfin, sur le plan physique, elle prolonge les approches constructales d'Adrian Bejan, en les articulant à la physique de l'information de Landauer (1961) et aux modèles causaux non linéaires de Baciu (2024). Ce positionnement interdisciplinaire permettrait de replacer l'IA dans un champ de dialogue entre flux thermodynamiques, organisation causale, et production de sens.

DEVELOPPEMENT – L'IA ET LA THERMODYNAMIQUE CONSTRUCTALE : GENERATIVITE MORPHOLOGIQUE ET ENTROPIE HEURISTIQUE

Dans le cadre de la thermodynamique constructale, formulée par Adrian Bejan (Bejan, 2024a ; 2024b ; 2023a ; 2023b), la morphogenèse est interprétée comme un processus naturel d'optimisation des flux : un principe universel selon lequel les systèmes évoluent pour faciliter l'accès aux courants qui les traversent. Lorsqu'on applique ce paradigme aux générateurs d'images architecturales dopés à l'IA, on perçoit une convergence structurante : les images ne sont plus de simples projections symboliques, mais des manifestations visuelles d'un équilibre dynamique entre entropie (complexité, diversité) et exergie (utilisabilité de l'énergie).

L'IA, dans sa capacité à structurer des ensembles de données hétérogènes, devient alors un simulateur d'organisation thermodynamique. Les réseaux de neurones, en particulier dans leur fonction générative, peuvent être interprétés comme des champs de gradients qui miment les flux thermiques, à la recherche d'une configuration qui maximise la circulation morphologique tout en minimisant les pertes. Ainsi, chaque image produite ne représente pas un objet figé, mais une transition entre états d'équilibre, capturée dans un espace formel.

Cette perspective invite à repenser l'architecture comme un système dissipatif ouvert, où l'IA agit non comme un outil d'automatisation, mais comme un agent dialogique et constructal. Le rôle de l'entropie y est double : elle introduit l'imprévisibilité nécessaire à la créativité, tout en servant de mesure critique face à la tentation de la standardisation algorithmique. La créativité architecturale ne réside alors pas dans la forme produite, mais dans le champ de possibilités qu'elle ouvre – un champ modélisé par des lois physiques, mais interprété par des logiques sémiotiques.

En somme, cette approche thermodynamique de l'IA générative permettra d'établir une méthodologie critique pour penser la conception comme une écologie dynamique de signes, de flux et de formes (Mavromatidis, 2024). Elle redonne à l'image architecturale sa charge heuristique : non pas ce qui est, mais ce qui devient pensable (Mavromatidis, 2024).

PRINCIPES DE TRANSFORMATION ET CONTRAINTES DANS LA CONCEPTION ARCHITECTURALE

Les réflexions de Carnot sur l'efficacité des machines thermiques ont conduit à la formulation des lois de la thermodynamique (Baciu, 2025). Selon la première loi, l'énergie est conservée. Toutefois, la deuxième loi introduit une contrainte : l'énergie disponible pour produire du travail diminue dans un système fermé, en raison de la tendance naturelle vers l'entropie. Autrement dit, les machines thermiques ne peuvent fonctionner indéfiniment sans perte d'énergie utile. Ce principe implique qu'un moteur ne peut pas produire plus de travail qu'il n'en reçoit, et qu'il est impossible de construire une machine à mouvement perpétuel.

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans les processus architecturaux peut être analysée à partir d'un cadre thermodynamique similaire. Une IA, lorsqu'elle génère des images ou propose des solutions formelles, transforme une entrée (prompts, données d'entraînement, contraintes) en sortie (image ou structure générée). Ce processus mobilise de l'énergie computationnelle et s'inscrit dans un cycle où l'information est traitée, organisée et restituée.

Comme une machine thermique, une IA présente des limites d'efficacité. L'output n'est jamais entièrement prédictible ou optimal ; des pertes se produisent sous forme de redondances, de généralisations excessives ou d'informations non pertinentes. Ce phénomène peut être comparé à la dissipation d'énergie dans une machine thermique : une partie de l'énergie investie n'est pas transformée en travail utile.

La thermodynamique constructale, formulée par Bejan, propose que les systèmes physiques tendent à évoluer vers des configurations qui facilitent les flux (Bejan, 2024a ; 2024b ; 2023a ; 2023b). Appliquée à l'IA en architecture, cette approche permet de concevoir les modèles comme des structures qui organisent et canalisent des flux de données en fonction d'un objectif de continuité formelle ou fonctionnelle. L'IA peut alors être considérée comme un système qui optimise la circulation des informations architecturales sous contraintes.

Cette analogie thermodynamique aide à comprendre que la production architecturale par IA est soumise à des lois physiques et computationnelles. Elle montre aussi que toute tentative d'automatisation complète de la

conception rencontre des limites, non en raison d'un défaut technique, mais en raison de principes fondamentaux liés à la transformation de l'énergie et de l'information.

La modélisation causale, telle qu'elle a été développée dans le cadre des sciences physiques et mathématiques, repose sur la description explicite des relations entre variables dans un système. À partir de l'analyse des conditions initiales et des mécanismes observables, un modèle causal vise à déterminer dans quelle mesure une variable influence une autre (Baciu, 2025a ; 2024). Ces modèles peuvent être linéaires ou non linéaires, statiques ou dynamiques, et sont utilisés pour prédire les effets de modifications structurelles sur un système donné (Baciu, 2025a ; 2024).

En conception architecturale assistée par IA, les modèles génératifs sont des systèmes complexes qui transforment des données d'entrée (prompts, images de référence, contraintes spatiales) en représentations visuelles ou formelles. Ce processus repose sur des relations internes entre variables (densité, proportion, lumière, usage, etc.) dont certaines peuvent être modélisées causalement. Par exemple, modifier un paramètre d'échelle peut entraîner une série de transformations dépendantes dans la configuration spatiale générée. Un cadre causal permettrait ici d'explicitier ces relations et de distinguer les dépendances nécessaires des corrélations accidentelles.

Dans ce contexte, les modèles causaux apportent un outil théorique et computationnel permettant de structurer les entrées, de prévoir les effets des modifications, et de tester la robustesse des sorties. Ils peuvent servir à évaluer la sensibilité d'un système IA à certains paramètres, ou à contraindre la génération formelle en fonction d'objectifs spécifiques, comme l'efficacité énergétique, la connectivité ou la résilience structurelle. L'intégration d'une structure causale dans les systèmes IA permettrait donc de mieux contrôler la transformation des données et d'interpréter plus rigoureusement les résultats produits.

En lien avec la thermodynamique, on peut considérer que les modèles causaux jouent un rôle similaire à celui des contraintes physiques : ils définissent un espace de possibilités dans lequel l'IA peut opérer. Tandis que la thermodynamique délimite les transformations énergétiques possibles, les modèles causaux organisent les dépendances structurelles entre variables. Ensemble, ces deux cadres permettent d'analyser la production architecturale IA non comme un processus aléatoire, mais comme une transformation régie à la fois par des flux physiques

(énergie, information) et des structures relationnelles (causalité).

Contraintes physiques implicites et biais thermodynamiques dans les espaces morphogénétiques générés par intelligence artificielle

Dans les systèmes de génération formelle assistés par intelligence artificielle, l'ensemble des configurations architecturales réalisables est borné par un sous-ensemble de contraintes physiques, souvent non explicites dans les modèles mais incorporées indirectement par le biais des données d'entraînement, des objectifs d'optimisation ou des fonctions de coût associées. Ces contraintes traduisent des régularités empiriques issues du comportement thermodynamique des environnements bâtis. Par exemple, une géométrie empêchant la ventilation naturelle ou l'entrée de lumière peut être sous-représentée dans les corpus utilisés pour l'entraînement du modèle, ou filtrée lors d'une phase d'évaluation selon des critères de performance. Ce phénomène introduit un biais dans l'espace morphologique généré : les solutions compatibles avec une distribution efficace des flux (air, chaleur, lumière) sont statistiquement privilégiées.

Il en résulte une orientation thermodynamique implicite de l'espace génératif : les formes produites tendent à maximiser la diversité géométrique (assimilable à une mesure d'entropie) tout en maintenant un certain niveau d'utilisabilité énergétique ou fonctionnelle (exergie). Cet équilibre contraint, observable dans les sorties du modèle, structure un espace de conception où les configurations morphologiques sont régulées à la fois par des principes statistiques et par des dynamiques de flux compatibles avec les lois de la physique.

STRUCTURATION DE L'ESPACE MORPHOLOGIQUE PAR DEPENDANCES CAUSALES

Les systèmes d'intelligence artificielle utilisés dans la génération architecturale manipulent des ensembles de variables interdépendantes, dont les interactions conditionnent la structure et la cohérence des configurations produites. La modélisation causale, en tant que cadre formel d'analyse des relations directionnelles entre variables, fournit un outil pertinent pour comprendre et encadrer ces processus de transformation.

Un modèle causal explicite permet de représenter les dépendances structurelles entre grandeurs telles que la surface au sol, la hauteur sous plafond, l'orientation, ou encore la densité programmatique. Dans un contexte de génération automatique, ces relations peuvent être intégrées à travers des graphes causaux, des règles paramétriques, ou des architectures de réseau incorporant des dépendances fonctionnelles. Ces structures limitent les trajectoires admissibles dans l'espace de génération en interdisant certaines combinaisons incohérentes ou inefficaces.

En pratique, l'espace des possibilités formelles d'un système IA est donc restreint par la topologie du graphe causal sous-jacent. Celui-ci détermine la sensibilité des formes générées à des modifications locales de paramètres, ainsi que leur robustesse aux variations contextuelles (changement d'usage, contrainte réglementaire, variation climatique). Le système ne génère pas des objets indépendamment, mais selon des trajectoires dirigées dans l'espace morphologique, dictées par des relations de dépendance inférées ou imposées.

L'intégration explicite des modèles causaux permet par conséquent de mieux contrôler la propagation des effets induits par un changement de variable, et d'assurer la cohérence systémique des propositions formelles. Combinée à la dynamique thermodynamique des flux, cette structuration causale contribuerait à une modélisation rigoureuse de l'espace génératif architectural, en le contraignant non seulement par la physique, mais aussi par la logique relationnelle des paramètres de conception.

MÉTHODOLOGIE – MODÉLISATION CAUSALE NON LINÉAIRE ET THERMODYNAMIQUE DE LA GÉNÉRATION ARCHITECTURALE

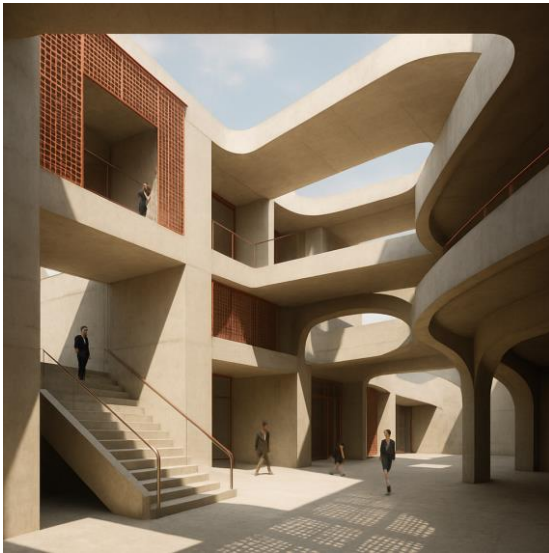
La méthode présentée dans cet article ne prétend pas constituer un protocole expérimental stabilisé au sens strict, ni produire des résultats généralisables. Elle doit être comprise comme une construction heuristique en cours, visant à formuler des hypothèses interprétatives sur les mécanismes de production et de réception des images architecturales générées par intelligence artificielle.

L'objectif méthodologique est double : d'une part, assurer la traçabilité computationnelle de la production du métasigne généré par intelligence artificielle ; d'autre part, proposer une modélisation théorique non-linéaire du processus causal de transformation conceptuelle opérée par la machine,

éclairée par les principes de la thermodynamique hors équilibre. L'étude repose sur une expérience de génération architecturale conduite à l'aide du modèle multimodal GPT-4o (OpenAI). Le prompt formulé était : « *Génère une image d'un rendu architectural ; l'idée est de fournir des qualités spatiales en tant que métasigne.* » Deux itérations ont été réalisées le 29 avril 2025 à 17 h 29 (UTC + 1), dans des conditions contrôlées et identiques. Les deux images produites ont ensuite été soumises à un groupe de douze étudiant.e.s en architecture (niveau M1-M2), invités à les évaluer selon cinq critères : la matérialité, la lumière, la forme, la circulation et l'échelle. L'analyse des données a combiné un traitement sémantique fondé sur des modèles de plongement lexical (*sentence-transformers*) avec une normalisation des scores d'interprétation exprimés par une variable Φ . Dans ce dispositif, l'IA a pour rôle de générer les images et d'explicitier ses choix ; ensuite on interprète les structures causales implicites sous-jacentes aux productions ; et les étudiant.e.s valident empiriquement les correspondances sémantiques perçues.

Cette triangulation entre IA, chercheur et participants humains assure une validation croisée du processus, articulant dimensions computationnelles, théoriques et perceptives de l'expérience. Aucun réglage technique supplémentaire n'étant paramétrable par l'utilisateur, la reproductibilité tient ici à la conservation du prompt, de l'horodatage, du contexte et de l'itération du modèle. L'image produite est considérée comme une entité sémiotique composite, c'est-à-dire comme une configuration de traits visuels (matériaux, lumière, spatialité) activant des circuits interprétatifs préalablement appris par le modèle. Toutefois, pour sortir d'une lecture subjective ou simplement herméneutique, on pose ici que la production de cette image relève d'un processus d'inférence causale non linéaire, qu'on a modélisé ensuite à travers une double dynamique : (1) une propagation structurée d'états à travers une dimension causale multivariée, et (2) une évolution entropique du système, caractérisée par la conversion d'une énergie computationnelle en réduction structurée d'incertitude interprétative (loi constructale).

Conformément à une épistémologie critique, l'objectif de cette démarche n'est pas de confirmer une théorie préexistante, mais de proposer des conjectures réfutables. Le nombre volontairement limité d'images générées et de participants impliqués ne permet pas de valider statistiquement les relations mises en évidence, mais sert à identifier des régularités potentielles, appelées à être mises à l'épreuve dans des travaux ultérieurs.



a)



b)

Fig. 1 Images générées avec chat GPT4o le 29.04.2025 à 17h29) a) Premier variant, b) deuxième variant

Les images architecturales générées ne sont pas ici des simples artefacts visuels, mais des condensations formelles d'un flot causal interprété par l'IA comme minimisation locale d'entropie sous contrainte thermodynamique computationnelle selon la loi constructale. Par la suite, il a été demandé au modèle : « *Comment as-tu traduit les mots en espace ?* » Cette interrogation a donné lieu à une chaîne logique d'arguments mettant en lumière un processus d'inférence causale structuré et cohérent. L'intention première était d'explorer la manière dont les qualités spatiales peuvent agir en tant que "méta-signes", c'est-à-dire non seulement répondre à des fonctions utilitaires, mais aussi transmettre des idées abstraites à travers l'espace, la matérialité et la lumière. Plusieurs gestes architecturaux ont été mobilisés par le modèle IA pour donner corps à cette ambition :

- **Matériau comme Message** : Le béton brut, utilisé comme fondation visuelle et matérielle, évoque selon les arguments donnés par le IA "la permanence, la neutralité et la stabilité". En contraste, des treillis métalliques rouge-orangé (Fig.1a) introduisent "légèreté, chaleur et filtrage lumineux, suggérant une perméabilité visuelle et symbolique".
- **Lumière comme "Voix Spatiale"** : Les ouvertures géométriques et les parois ajourées permettent à la lumière naturelle de dessiner des motifs changeants, faisant de l'ombre un élément actif. Ce jeu dynamique devient un "méta-signe temporel", rendant perceptibles les cycles naturels et les rythmes du lieu.
- **Forme comme Flux** : Des passerelles courbes des "poutres flottantes" et des dalles en béton armé instaurent un mouvement fluide, effaçant les délimitations strictes entre pièces ou niveaux. L'expérience spatiale devient alors narrative : tensions, libérations, invitations à l'exploration.
- **Échelle et Figure Humaine** : De petites silhouettes humaines disséminées dans le rendu instaurent une monumentalité mesurée — suscitant l' "émerveillement" tout en conservant une possibilité d'intimité et d'usage humain.

L'image ne représente donc pas simplement un bâtiment, mais une "traduction spatiale" de notions telles que la perception, le passage, et la présence qui a été faite par l'IA sous la base d'un raisonnement causal sous-jacent. Le processus de génération de ces images par le modèle d'IA ne repose pas sur une modélisation causale formelle, mais sur une chaîne narrative causale, implicite, typique du raisonnement en design :

- **Causalité Conceptuelle → Spatiale**
Entrée : Qualités spatiales comme méta-signes. / **Inférence** : Si l'on veut que l'architecture signifie, alors les matériaux, la lumière, la géométrie et la circulation doivent agir comme agents de communication. / **Résultat** : Arches (ouverture), escaliers (hiérarchie), patios (rassemblement).
- **Causalité Forme-Fonction / Hypothèse** : Certaines formes spatiales produisent des effets expérientiels spécifiques. / **Exemple** : Une grande arche ouverte provoque un sentiment d'ouverture et de passage.

- **Causalité Métaphorique / Exemple :** Le béton suscite la perception de stabilité et de "brutalité" neutre. Ces effets sont fondés sur des associations symboliques apprises.

En résumé, une chaîne causale abstraite — *concept* → *matière* → *forme* → *expérience* — guide le processus de génération. Elle fonctionne comme un arbre de décisions architecturales *ad hoc* structurant les images produites.

APPROCHE THERMODYNAMIQUE DU RAISONNEMENT DE LA MACHINE

En arrière-plan, le modèle IA mobilise un raisonnement causal et computationnel qui peut être interprété également en termes thermodynamiques. L'approche thermodynamique proposée dans cette recherche se déploie sur deux niveaux distincts mais complémentaires.

Au premier niveau, celui du raisonnement computationnel, la thermodynamique est comprise dans son acception informationnelle et énergétique : les modèles génératifs, tels que GPT-4o, fonctionnent comme des systèmes dissipatifs cherchant à minimiser leur entropie interne tout en maximisant la cohérence des flux de données. Cette dynamique d'optimisation — comparable à la loi constructale de Bejan (2012) — décrit la manière dont les réseaux neuronaux redistribuent l'énergie informationnelle pour atteindre des configurations stables, analogues à des équilibres thermodynamiques locaux.

Au second niveau, celui de l'image produite, la thermodynamique devient morphogénétique et sémiotique. Les notions d'entropie et d'exergie y renvoient non plus à la gestion énergétique de la machine, mais à la tension entre complexité et cohérence formelle dans la composition visuelle.

L'image générée est alors considérée comme une structure ouverte, traversée de flux formels et narratifs qui traduisent des gradients de sens. Dans ce cadre, la thermodynamique n'explique pas seulement la production technique de l'image, mais aussi la manière dont celle-ci organise la signification à travers ses régularités, ses déséquilibres et ses condensations symboliques.

La distinction de ces deux plans — thermodynamique computationnelle et thermodynamique sémiotique — permet d'éviter toute ambiguïté conceptuelle : la première décrit la dynamique interne de l'IA, la seconde rend compte de la morphologie signifiante de ses productions.

Le modèle cérébral de la machine

Dans le cadre de la physique de l'information, penser revient à manipuler l'information — soit des opérations logiques impliquant des transformations d'énergie et une gestion de l'entropie. Selon le principe de Landauer (1961) :

«*Toute opération logiquement irréversible (comme l'effacement d'un bit ou la mise à jour d'une croyance) doit être accompagnée d'une augmentation d'entropie dans l'environnement.* »

Ainsi, chaque inférence ou décision prise par le modèle IA implique un coût énergétique.

Chaînes causales comme réduction d'entropie

Le raisonnement produit une compression des états possibles en un sous-ensemble ordonné, ce qui revient à une réduction locale d'entropie. En termes simples :

- États aléatoires = entropie élevée.
- Raisonnement organisé = entropie plus faible.

Le raisonnement causal — tel que la chaîne *concept* → *matière* → *forme* → *expérience* — fonctionne comme un chemin de réduction d'entropie interne, au prix d'une augmentation d'entropie externe (sous forme de chaleur générée par l'outil IA utilisé).

Interprétation thermodynamique des étapes

Le traitement de l'information peut être lu sous l'angle de la thermodynamique, chaque étape correspondant à une transformation énergétique spécifique. À la réception du *prompt*, le système absorbe un signal structuré : cette entrée d'énergie perturbe l'état initial et déclenche le processus. Lors de l'interprétation du concept, cette énergie est convertie en réorganisation interne des micro-états du réseau — accès à la mémoire, basculement de bits, ajustements pondérés — provoquant une augmentation temporaire d'entropie avant sa stabilisation.

L'inférence causale oriente ensuite ce flux d'énergie pour établir des relations conditionnelles entre le signal et les connaissances stockées, analogues à un transport dirigé visant à réduire l'incertitude et à maximiser la cohérence des corrélations. Enfin, la production de sortie clôt le cycle : l'énergie résiduelle est condensée en une forme structurée et compréhensible. Ce processus correspond à une réduction d'entropie, conforme à la loi constructale, par laquelle l'information diffuse se convertit en message à haute densité sémantique. Chaque phase du traitement cognitif demeure

étroitement liée à des dynamiques énergétiques internes, révélant la nature physique de la computation. La performance de ce processus dépend principalement de trois facteurs.

D'abord, l'efficacité du support matériel, mesurable en joules par opération logique : plus le dispositif est efficace, moins il consomme d'énergie pour traiter une unité d'information. Ensuite, la complexité algorithmique intervient : des chaînes de raisonnement longues ou imbriquées exigent davantage d'opérations et donc une dépense énergétique accrue. Enfin, le degré d'irréversibilité computationnelle influe sur le coût thermique global : une computation qui efface de l'information ou modifie irréversiblement ses états internes accroît l'entropie du système.

L'interaction entre ces trois paramètres — efficacité matérielle, complexité algorithmique et irréversibilité des opérations — détermine ainsi la consommation énergétique totale du raisonnement computationnel.

VERS UNE QUANTIFICATION DE L'EFFICACITE SEMIOTIQUE DU METASIGNE

La capacité des systèmes d'intelligence artificielle à produire des formes architecturales dotées de sens exige un cadre formel d'évaluation dépassant la simple apparence visuelle. Cette section vise à opérationnaliser la notion de métasigne, entendue comme condensateur sémiotique issu d'une dynamique computationnelle. L'objectif est de quantifier l'efficacité sémiotique des artefacts générés en articulant la structure causale du processus et la dépense entropique nécessaire à l'émergence du sens. En associant modélisation causale non linéaire et contraintes thermodynamiques computationnelles, il s'agit de déterminer les conditions dans lesquelles un artefact peut être reconnu comme métasigne opératoire : une figure où se combinent cohérence narrative, compression causale et économie énergétique. Ce déplacement du visible vers le mesurable ouvre la voie à une évaluation sémiotique des performances des IA génératives, fondée sur la relation entre production de sens, réduction d'incertitude et coût informationnel.

Avant de présenter la formalisation mathématique de l'efficacité sémiotique du métasigne (Σ), il est essentiel d'en expliciter la logique et le rôle. Cette métrique vise à quantifier la cohérence globale d'un processus de génération d'images architecturales, en articulant trois dimensions interdépendantes : la structure narrative (Φ), l'entropie causale (H) et la

traçabilité causale (κ). L'objectif n'est pas de réduire le sens à une valeur numérique, mais de décrire la stabilité informationnelle d'un ensemble signifiant. En d'autres termes, Σ permet de mesurer la manière dont une image — produite par l'IA et interprétée par un observateur humain — conserve, transforme ou amplifie la signification qu'elle porte à travers les flux formels et symboliques qui la constituent. Concrètement :

- Φ (phi) correspond au degré de cohérence narrative détectable dans la relation entre le prompt, l'image générée et sa lecture humaine. Une valeur élevée de Φ (proche de 1) indique une continuité forte entre intention, génération et interprétation.
- H (entropie causale) mesure la diversité et la complexité des relations causales dans le processus génératif, c'est-à-dire la richesse des états possibles explorés par le modèle d'IA. Une valeur élevée de H traduit une forte variabilité formelle, donc un potentiel créatif accru, mais aussi une incertitude sémiotique plus grande.
- κ (kappa) indique le degré de traçabilité des transformations causales : plus κ est élevé, plus il est possible de relier les étapes de la génération (prompts, itérations, ajustements) à des effets formels identifiables dans l'image finale.

La combinaison de ces trois paramètres aboutit à la formulation synthétique suivante : $\Sigma = f(\Phi, H, \kappa)$ où Σ représente l'efficacité sémiotique du métasigne, comprise comme la capacité d'un système génératif à produire du sens structuré tout en maintenant un équilibre entre cohérence, diversité et transparence causale.

Sur le plan interprétatif, des valeurs élevées de Σ traduisent des images dont la composition présente à la fois une clarté sémantique et une profondeur narrative, tandis que des valeurs plus faibles signalent des configurations formelles dispersées ou difficilement lisibles. Par exemple, une image évaluée à $\Sigma \approx 0,8$ correspond à une structure fortement cohérente, où les éléments formels soutiennent un sens stable et identifiable. À l'inverse, une image à $\Sigma \approx 0,3$ traduit une dispersion interprétative : le sens émerge par fragments, sans organisation globale.

Ainsi, Σ agit comme un indicateur de la vitalité sémiotique des productions IA : elle ne mesure pas la beauté ni la qualité esthétique, mais la capacité d'une image à organiser le sens à travers des flux formels, informationnels et perceptifs.

Formellement, on pose le modèle suivant. Soit un espace d'état S , constitué d'un ensemble de variables morphogénétiques $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ représen-

tant des attributs spatiaux (proportion, densité, lumière, matériau, accessibilité, etc.). Ces variables sont connectées par un espace causal orienté $G=(V,E)$, où chaque nœud V_i correspond à une variable X_i , et chaque arête E_{ij} correspond à une relation causale dirigée, potentiellement non linéaire. Chaque relation est modélisée par une fonction $f_{ij}(X_i)$, décrivant l'influence de X_i sur X_j . La dynamique du système suit alors une équation du type :

$$X_j(t + \Delta t) = f_{ij}(X_i(t)) + \eta_j(t) \quad (1)$$

où $\eta_j(t)$ est un terme stochastique introduisant la variabilité causale non déterministe (intrinsèque au fonctionnement de réseaux de neurones profonds), assimilable à une fluctuation entropique locale. Sur cet espace causal, on peut définir une fonction entropique globale $H:S \rightarrow \mathbb{R}^+$, mesurant le degré d'indétermination structurelle du système, inspirée de l'entropie de Shannon mais modifiée pour inclure la dépendance causale non linéaire :

$$H(t) = - \sum_{i=1}^n P(X_i(t)) \cdot \log P(X_i(t) | Pa(X_i)) \quad (2)$$

où $Pa(X_i)$ représente l'ensemble des parents causaux de X_i , dans le graphe G . Cette formulation permet de capturer non seulement la distribution des variables, mais leur structuration causale conditionnelle — point fondamental dans l'analyse du métasigne comme événement structuré plutôt que donné brut.

Le fonctionnement de l'IA est alors interprété comme une minimisation dirigée de cette entropie sous contrainte énergétique. Selon le principe de Landauer, chaque opération causale irréversible (mise à jour d'un état, élimination d'un chemin causal, convergence morphologique) génère une dissipation minimale d'énergie thermique qui suit la formule $kT \ln 2$ par bit effacé. Ainsi, le système tend à parcourir un chemin de minimisation de H , tout en maximisant une fonction que l'on peut nommer fonction d'utilité formelle Φ correspondant à la cohérence du métasigne (qualité narrative, densité symbolique, compatibilité formelle), sous une contrainte énergétique E_{max} déterminée par les capacités du modèle d'IA comme suit :

Minimiser $H(t)$ sous $E(t) \leq E_{max}$ et $\Phi(t) \geq \Phi_{min}$

Cette formalisation établit un pont radical entre modèles causaux non linéaires et thermodynamique constructale computationnelle, où l'image architecturale produite devient un état d'équilibre local, interprété comme métasigne thermosémiotique ; une configuration optimale de

réduction d'entropie causale, exprimée visuellement sous contraintes physiques simulées.

Il en résulte que l'interprétation de l'image générée n'est pas une projection arbitraire du spectateur, mais la reconnaissance *a posteriori* d'un chemin causal efficace parcouru par le système pour réduire l'indétermination sémiotique initiale. Ce modèle permet ainsi de reconsidérer l'IA non comme un agent génératif, mais comme un opérateur constructal, qui organise dynamiquement les flux informationnels vers des configurations maximisant la transmissibilité symbolique dans un espace formel contraint. L'architecture générée devient, dès lors, le résidu visible d'une thermodynamique causale orientée vers la signifiante architecturale.

Dans cette perspective, il devient essentiel de proposer une quantification opératoire de l'efficacité sémiotique du métasigne généré. Pour ce faire, on peut introduire la fonction Σ , définie comme mesure de la densité sémiotique causale d'un artefact généré par intelligence artificielle dans un contexte architectural. Cette fonction vise à estimer la capacité d'une configuration formelle à produire de la signifiante par condensation causale et réduction entropique. Formellement, on la définit ainsi :

$$\Sigma = \frac{\Phi}{H} \cdot \kappa \quad (3)$$

Pour illustrer ce modèle, appliquons-le au cas généré dans cette étude à partir du prompt :

« Génère une image d'un rendu architectural ; l'idée est de fournir des qualités spatiales en tant que métasigne. »

L'analyse des commentaires humains issus d'un échantillon mixte a permis d'identifier une convergence sur trois dimensions : la matérialité comme porteur de permanence, la lumière comme articulation rythmique et la géométrie comme invitation au mouvement. Ces dimensions forment une triple inférence causale cohérente : béton brut → stabilité, trame ajourée → temporalité, circulation diagonale → récit spatial.

Allons voir maintenant comment on a procédé pour identifier la valeur du Φ . Le processus d'évaluation débute par l'analyse du prompt initial, lequel contient des marqueurs intentionnels forts tels que le rendu architectural, les qualités spatiales, et surtout le métasigne. Ces termes ne sont pas neutres : ils orientent d'emblée l'attente interprétative vers une cohérence entre l'image générée et un certain régime de signifiante, impliquant notamment une forme expressive, une lumière signifiante et une matérialité symbolique.

À la suite de la génération de l'image par le modèle GPT-4o, une relance explicite a été formulée :

« Comment as-tu traduit les mots en espace ? »

Le modèle a produit une réponse structurée, articulant plusieurs dimensions interprétatives : le béton brut comme symbole de stabilité, les treillis métalliques colorés comme médiateurs de chaleur et de porosité lumineuse, la lumière naturelle comme rythme temporel, et la circulation fluide comme trame narrative de l'espace.

Pour formaliser la correspondance entre intention et réalisation, une analyse NLP a été menée à l'aide d'un modèle de vectorisation sémantique (*sentence-transformers*). Les unités lexicales clés du prompt (espace, qualité, rendu, métasigne) ont été comparées à celles de la réponse générée (lumière, filtrage, neutralité, rythme, perception). Cette confrontation a révélé des ponts sémantiques explicites : le métasigne se manifeste dans l'articulation matière-perception-rythme, la qualité spatiale dans le filtrage lumineux et la circulation narrative, et le rendu architectural dans la synthèse forme-lumière-matière.

Sur la base de cette cartographie sémantique, une matrice de correspondance a été construite. À chaque dimension sémiotique — matière, lumière, forme, circulation, échelle humaine — a été attribué un score ϕ_i compris entre 0 et 10, reflétant le degré de recouvrement sémantique observé par les sondés.e.s. La matérialité, représentée par le béton, a obtenu un score élevé de 9 en raison de sa forte correspondance symbolique avec l'idée de stabilité, la lumière, bien exploitée dans sa fonction de rythme et de variation, a été notée 8, la forme, plus modestement représentée par des passerelles, a reçu un score de 7, la circulation, présente mais peu élaborée, a été évaluée à 6, enfin, l'échelle humaine, à peine esquissée par la présence discrète (et absence : Figure 1b) de silhouettes, a été jugée faible, avec un score de 5.

Ces valeurs ont été normalisées sur l'intervalle $[0,1]$ puis intégrées dans le calcul global de Φ (fonction d'utilité narrative), par la moyenne arithmétique des scores normalisés. On a pu ainsi inférer une valeur de $\Phi \approx 0.8$ sur une échelle de 0 à 1, selon une grille de codage sémantique. La fonction entropique H , mesurée sur le graphe de variables spatiales estimé (matériau, lumière, ouverture, échelle, usage), indique une incertitude conditionnelle moyenne : $H \approx 1.2$ bits. Enfin, le coefficient de traçabilité causale, fondé sur l'explicitation des chaînes causales dans les commentaires IA-humains croisés, s'établit à $\kappa \approx 0.75$.

On a obtenu alors $\Sigma = 0.5$. Ce résultat modéré signale un métasigne à efficacité sémiotique partielle : le système d'IA a produit une structure partiellement lisible, porteuse de sens dans certaines dimensions symboliques, mais incapable d'articuler une

sémiose complète et pleinement intégrée. Il est significatif que l'entropie causale reste relativement élevée malgré une forme cohérente : cela indique une charge interprétative encore portée par le sujet humain, preuve que l'IA n'a pas encore atteint l'auto-complétude sémiotique. Ce modèle mathématisé permet non seulement de formaliser les interactions entre structure formelle, signification symbolique et dynamique énergétique de génération, mais aussi de proposer un critère de performance sémiotique applicable à d'autres artefacts IA-architecturaux. Il appelle le développement de systèmes d'évaluation automatique hybrides, croisant modélisation causale, thermodynamique computationnelle et extraction sémantique. De tels dispositifs permettraient de réguler, critiquer et orienter la production générative vers une densification du métasigne, en rendant quantifiable ce qui n'était jusqu'ici que ressenti.

Ainsi, penser l'image architecturale générée par IA comme un métasigne thermosémiotique revient à la considérer non plus comme un résultat visuel, mais comme une interface de transduction causale, où flux d'énergie, décisions algorithmiques et attentes humaines s'agrègent dans une figure dynamique d'équilibre sémiotique. L'efficacité d'un tel métasigne ne peut être jugée uniquement par sa qualité esthétique, mais par sa capacité à émerger — comme une forme singulière — d'un conflit réglé entre contrainte physique, logique causale et désir de sens.

CONCLUSION- CONJECTURES THERMOSEMIOTIQUES ET LIMITES METHODOLOGIQUES

Cette recherche a proposé une lecture expérimentale et théorique des images architecturales générées par intelligence artificielle, en les interprétant comme des métasignes issus d'une dynamique conjointe entre flux informationnels, contraintes thermodynamiques et structures sémiotiques. En articulant la thermodynamique constructale, la modélisation causale non linéaire et la sémiotique architecturale, l'article a cherché à déplacer le regard critique : non plus analyser uniquement les formes produites par l'IA, mais interroger les conditions de production et de stabilisation du sens dans les images générées.

Toutefois, conformément à une épistémologie critique poppérienne, il convient de souligner que les résultats présentés ici ne sauraient être compris comme des validations définitives. La méthode

mise en œuvre relève d'une démarche exploratoire, fondée sur un nombre volontairement restreint d'images générées et de participants, et ne permet pas d'établir des lois générales sur le fonctionnement sémiotique de l'intelligence artificielle en architecture. Les relations identifiées entre matière, perception et rythme, ainsi que la chaîne interprétative concept \rightarrow matière \rightarrow forme \rightarrow expérience, doivent être considérées comme des hypothèses de travail, et non comme des modèles causaux stabilisés. L'ambition de cette étude n'était pas de confirmer empiriquement un cadre théorique préétabli, mais de formuler des conjectures réfutables concernant la manière dont les systèmes d'IA générative organisent, condensent et redistribuent du sens à travers des configurations visuelles. En ce sens, la métrique proposée (Σ), articulant cohérence narrative (Φ), entropie causale (H) et traçabilité (κ), ne constitue pas un instrument de mesure achevé, mais un outil conceptuel provisoire, destiné à rendre discutables et comparables des phénomènes habituellement appréhendés de manière intuitive ou subjective.

L'intérêt principal de cette approche réside précisément dans son caractère non conclusif. L'article ouvre un espace critique où les hypothèses formulées peuvent être mises à l'épreuve, prolongées ou infirmées par des protocoles ultérieurs plus étendus. La scientificité de la démarche ne tient donc pas à la généralisation des résultats, mais à leur caractère révisable, susceptible d'être prolongé, nuancé et précisé.

Dans cette perspective, le métasigne architectural ne doit pas être compris comme une propriété intrinsèque des images générées par l'IA, mais comme un effet émergent, conditionné par un ensemble de paramètres techniques, culturels et interprétatifs. L'intelligence artificielle apparaît alors moins comme un agent autonome de production de sens que comme un opérateur constructal, organisant des flux informationnels selon des régularités probabilistes et énergétiques, dont la signification reste partiellement ouverte et dépendante du regard critique humain.

En conclusion, cette recherche ne prétend pas clore un champ d'investigation, mais en esquisser les contours. Elle propose une première formalisation théorique d'un problème encore largement inexploré : celui de la thermodynamique du sens dans les images architecturales générées par intelligence artificielle. Les pistes ouvertes ici appellent des développements méthodologiques futurs — élargissement du corpus, diversification des modèles d'IA, intégration d'outils quantitatifs complémentaires — afin de soumettre les conjectures avancées à des tests plus rigoureux. C'est dans cette tension entre hypothèse et réfutation, entre audace conceptuelle et prudence empirique, que peut se construire une épistémologie critique de la conception architecturale augmentée par l'intelligence artificielle.

RÉFÉRENCES

- BACIU, Dan Costa. Neural networks through the lens of evolutionary dynamics. In *BioSystems*, Volume 248, 2025a, 105386, ISSN 0303-2647, <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2024.105386>.
- BACIU, Dan Costa. Sigfried Giedion's Chicago school: a midpoint in 150 years of history, part 1, seen through Giedion's eyes. In *The Journal of Architecture*, 2025b, 1–25.
- BACIU, Dan Costa. Causal Modeling and Thermodynamics: Towards a new convergence of the two fields. In *BioSystems*, Volume 246, 2024, 105338, ISSN 0303-2647, <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2024.105338>.
- BARTHES, Roland (1964). *Rhétorique de l'image*. *Communications*, 4, 40–51.
- BARTHES, Roland (1982). *L'Obvie et l'obtus: Essais critiques III*. Paris: Seuil.
- BEJAN, Adrian. Vascular flow design and predicting evolution. In *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Volume 155, 2024a, 107517, ISSN 0735-1933, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107517>.
- BEJAN, Adrian. The physics of the urge to have freedom. In *BioSystems*, Volume 243, 2024b, 105277, ISSN 0303-2647, <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2024.105277>.
- BEJAN, Adrian. Perfection is the enemy of evolution. In *Biosystems*, Volume 229, 2023b, 104917, ISSN 0303-2647, <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2023.104917>.
- BEJAN, Adrian. Constructal design evolution versus topology optimization. In *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Volume 141, 2023a, 106567, ISSN 0735-1933.
- ECO, Umberto (1968). *La Structure absente*. Paris : Mercure de France.
- ECO, Umberto (1976). *A Theory of Semiotics*. Bloomington : Indiana University Press.
- JENCKS, Charles (1969). *Meaning in Architecture*. London : Barrie & Rockliff.

JENCKS, Charles (1977). *The Language of Post-Modern Architecture*. London : Academy Editions.

LANDAUER, Rolf. Irreversibility and heat generation in the computing process. In *IBM Journal of Research and Development*, 1961, vol. 5, n° 3, p. 183-191.

Mc CORMACK, Jon ; HUTCHINGS, Patrick ; GIFFORD, Toby ; YEE – KING, Matthew ; LLANO, Maria Teresa ; D'INVERNO Mark. Design considerations for real-time collaboration with creative artificial intelligence. In *Organised Sound*. 2020;25(1):41-52. doi:10.1017/S1355771819000451.

MAVROMATIDIS, Lazaros. A constructal poly-narrative of architectural and urban practices and theories across history. In *Frontiers of Architectural Research*, [Volume 14, Issue 6](#), Pages 1750-1779, 2025a, ISSN 2095-2635, <https://doi.org/10.1016/j.foar.2025.03.004>.

MAVROMATIDIS, Lazaros. Constructal thermodynamics and its semantic ontology in autopoietic, digital, and computational architectural and urban space open systems. In *BioSystems*, Volume 249, 2025b, 105404, ISSN 0303-2647, <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2025.105404>.

MAVROMATIDIS, Lazaros. A heterogeneous architectural theory inspired by living thermodynamics: Unveiling “architectural ingenuity” using the constructal law. In *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Volume 155, 2024, 107554, ISSN 0735-1933, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107554>.

ROMBACH, Robin ; BLATTMANN Andreas ; LORENZ, Dominik ; ESSER, Patrick ; OMMER, Björn. High-Resolution Image Synthesis with Latent Diffusion Models. In *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, New Orleans, LA, USA, 2022, pp. 10674-10685, doi: 10.1109/CVPR52688.2022.01042.

SLAKTA, Denis. L'ordre du texte. In *Études de linguistique appliquée* N. S. 19, 1975. 30–42.

WEI, Jason ; WANG, Xuezhi ; SCHUURMANS, Dale ; BOSMA, Maarten ; ICHTER, Brian ; XIA, Fei ; CHI Ed H ; LE, Quoc ; ZHOU Denny. (2022). Chain-of-thought prompting elicits reasoning in large language models. In *Proceedings of the 36th International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS '22)*. Curran Associates Inc., Red Hook, NY, USA, Article 1800, 24824–24837.

ZHUANG, Xinwei ; ZHU, Pinru ; YANG, Allen ; CALDAS, Luisa. Machine learning for generative architectural design: Advancements, opportunities, and challenges. In *Automation in Construction*, Volume 174, 2025, 106129, ISSN 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106129>.