L'Ancre et le Flux : complémentarité cognitive entre braille et interfaces interprétatives dans les domaines formels

Madjid Sadallah
Universite Claude Bernard Lyon 1
CNRS, INSA Lyon, LIRIS, UMR5205
69622 Villeurbanne, France
madjid.sadallah@liris.cnrs.fr

Benoît Encelle
Universite Claude Bernard Lyon 1
CNRS, INSA Lyon, LIRIS, UMR5205
69622 Villeurbanne, France
benoit.encelle@liris.cnrs.fr

Alain Mille
Coexiscience & NatBraille Association
1 rue du Luizet
69100 Villeurbanne, France
alain.mille@gmail.com

Vivien Guillet
Universite Claude Bernard Lyon 1
CNRS, INSA Lyon, LIRIS, UMR5205
69622 Villeurbanne, France
vivien.guillet@univ-lyon1.fr

***Résumé*—La marginalisation du braille dans l'accessibilité numérique repose sur un paradigme de substitution modale postulant l'équivalence cognitive entre audio et accès tactile. Or, dans les domaines formels (mathématiques, programmation, sciences), cette équivalence s'effondre : les exigences de navigation non linéaire, de vérification syntaxique et de manipulation symbolique révèlent une complémentarité structurelle irréductible. Nous développons le modèle de l'Ancre et du Flux : l'Ancre (braille) assure stabilisation cognitive et audit épistémique, tandis que le Flux (audio-IA) permet exploration contextuelle et interaction fluide. Face aux hallucinations des IA génératives, le braille s'impose comme infrastructure critique de vérification indépendante. Nous établissons quatre principes normatifs de conception d'interfaces accessibles et soutenons que cette complémentarité constitue une nécessité architecturale de la cognition distribuée. Le droit à l'audit épistémique, matérialisé par l'accès braille, fonde ainsi la souveraineté cognitive à l'ère algorithmique.**

***Index Terms*—Accessibilité, Braille, Domaines formels, Cognition distribuée, Interfaces interprétatives**

I. Introduction

L'histoire des technologies d'assistance pour les personnes aveugles ou malvoyantes est structurée par un récit récurrent de substitution. Depuis la généralisation des lecteurs d'écran, l'audio s'est imposé comme modalité dominante d'accès à l'information : selon les enquêtes périodiques de WebAIM, plus de 70% des utilisateurs de lecteurs d'écran s'appuient exclusivement sur la sortie audio [1]. L'essor des assistants vocaux et des systèmes génératifs récents accentue cette dynamique, reléguant le braille au statut de technologie coûteuse et marginale [2]. Cette marginalisation repose sur l'hypothèse d'une équivalence cognitive entre accès auditif séquentiel et accès symbolique persistant. Or, les *domaines formels* — disciplines fondées sur la manipulation de symboles et de structures syntaxiques rigoureuses (mathématiques, informatique, sciences expérimentales) — exigent navigation non linéaire et vérification fine [3], [4].

Cette éviction se produit dans un contexte de crise documentée de la littératie braille [5], [6], corrélée à de fortes inégalités d'insertion professionnelle [7], [8]. Les recherches récentes confirment également les limites cognitives des solutions audio seules [9], [10], [11], tandis que plusieurs travaux soulignent l'intérêt de stratégies multimodales combinant braille et audio [12]. La persistance du braille dans les pratiques expertes indique qu'il remplit des fonctions irréductibles à ses alternatives audio, notamment pour la navigation complexe, la vérification et l'audit critique.

Pour répondre à ces enjeux, cet article propose le *modèle de l'Ancre et du Flux*, cadre théorique original qui conceptualise le braille et le couple (IA, audio) comme des systèmes cognitivement complémentaires, chacun optimisé pour des fonctions distinctes dans l'écologie cognitive des tâches formelles. Fondé sur les théories de la cognition distribuée [3], [13], des représentations externes [4], [14] et des ressources attentionnelles multiples [15], il constitue une *hypothèse explicative* visant à orienter la conception de systèmes d'accessibilité équitables à l'ère de l'IA.

Trois contributions sont formulées. Théoriquement, le modèle fournit un cadre pour comprendre la complémentarité braille–audio-IA. Conceptuellement, il positionne le braille comme infrastructure critique d'audit épistémique, garantissant souveraineté cognitive et participation équitable des personnes aveugles à la production scientifique. Opérationnellement, il dérive quatre principes de conception pour guider le développement de systèmes accessibles et équitables. Ces contributions s'appuient sur des observations convergentes — qualifiées de *traceurs empiriques* pour souligner qu'elles attestent la plausibilité du cadre sans constituer une validation systématique — et relèvent d'une *théorisation ancrée*, appelant des validations empiriques ultérieures. L'article s'articule autour de ces contributions : il contextualise d'abord la crise de la

littératie braille et ses enjeux socio-cognitifs, expose ensuite les fondements théoriques du modèle et ses implications face aux défis de l'IA, et en déduit enfin les principes de conception pour le développement de systèmes accessibles et équitables.

II. La crise de la littératie braille et ses enjeux

La littérature documente un déclin de la maîtrise du braille : moins de 10% des personnes aveugles l'utilisent aux États-Unis et au Royaume-Uni, et 28% en France [5], [6], [16]. Cette baisse, associée à la généralisation des lecteurs d'écran depuis les années 1990 [17], traduit une tendance durable, bien que l'hétérogénéité méthodologique des enquêtes invite à la prudence [2]. Ce recul n'est pas neutre socialement : pour les aveugles de naissance ou prélinguaux, le braille est d'abord le seul vecteur d'un apprentissage de la lecture au sens développemental — écouter n'est pas lire [18], [19]. Au-delà, la pratique du braille est fortement corrélée à l'emploi, avec des taux de 56–85% chez les utilisateurs contre 23–45% chez les non-utilisateurs [7], [20], [8]. Parmi les personnes totalement aveugles, la maîtrise avancée du braille est fortement associée à l'emploi : les individus employés ont près de quatre fois plus de chances de posséder ces compétences, suggérant un avantage d'employabilité lié à la maîtrise du braille [21].

Cette corrélation suggère un mécanisme cognitif sous-jacent plutôt qu'un simple effet de sélection sociale : la maîtrise du braille est associée à une littératie formelle avancée — orthographe, syntaxe, structures symboliques — ainsi qu'à une autonomie cognitive accrue dans la manipulation d'informations complexes [7], [21]. Dans les filières scientifiques et techniques, cette association devient particulièrement saillante. Des études qualitatives rapportent que les professionnels aveugles dans les domaines formels exigeants (programmation, analyse de données, modélisation) sont majoritairement utilisateurs quotidiens de plages braille [22], [23], décrivant le braille comme essentiel pour la vérification de code, la manipulation de structures de données et la validation de résultats — fonctions résistantes à l'automatisation par l'audio.

Cette persistance paradoxale motive notre interrogation : pourquoi le braille demeure-t-il indispensable aux pratiques expertes malgré sa marginalisation ? Nous soutenons qu'il incarne une complémentarité fonctionnelle structurelle que le paradigme de substitution modale échoue à conceptualiser.

III. Le braille conceptualisé comme infrastructure de représentation externe

A. Du cadre théorique aux propriétés matérielles

Les théories de la cognition distribuée [3], [13] et des artefacts cognitifs [14], [24] établissent que les représentations externes reconfigurent fondamentalement l'espace des opérations cognitives possibles. Il a été démontré que la structure matérielle d'une représentation transforme qualitativement stratégies et performances : selon la configuration externe du problème, les stratégies de résolution et les taux de succès varient de façon radicale [4]. La cognition se distribue entre esprit et environnement matériel.

Nous considérons le braille non comme un simple transcodage visuel-tactile, mais comme une infrastructure externe dotée de quatre propriétés inaccessibles à l'audio séquentiel : (1) **Persistance** — L'information reste accessible en permanence, contournant les limites de la mémoire de travail en permettant de la stocker dans l'environnement plutôt que dans l'esprit [25] ; (2) **Manipulabilité** — L'utilisateur peut réorganiser, annoter, segmenter l'information selon ses besoins, passant de récepteur passif à acteur épistémique capable de restructurer l'espace du problème [24] ; (3) **Localisation spatiale stable** — Chaque symbole possède une « adresse » physique fixe, permettant une navigation directe et non séquentielle. Les repères spatiaux stables servent d'ancres mnésiques [26] ; et (4) **Granularité maximale** — Accès au niveau du symbole individuel (caractère, chiffre, opérateur, ponctuation), indispensable pour vérification syntaxique et débogage.

Ces propriétés contrastent avec l'audio séquentiel : *évanescence* (disparition post-énonciation), *linéarité forcée* (parcours strictement séquentiel), *non-localisation* (absence de coordonnées spatiales), et *granularité variable* (dépendant de la segmentation du système de synthèse vocale).

B. Propriétés matérielles et implications cognitives

Ces propriétés matérielles fondent les fonctions cognitives que nous détaillerons dans le modèle de l'Ancre (Section V) : stabilisation de la charge cognitive, vérification syntaxique précise, production formelle autonome, et audit épistémique indépendant. Nous illustrons ici leur manifestation empirique à travers trois traceurs convergents.

Décharge cognitive par externalisation. En externalisant le stockage, le braille contourne les limites de la mémoire de travail [27], libérant les ressources pour les opérations de haut niveau [25], [28]. Les gains observés dans cette étude sur la géométrie 3D sont attribués aux fonctionnalités interactives de l'application ayant soutenu la résolution autonome — résultats cohérents avec l'hypothèse d'une décharge de la mémoire de travail par externalisation.

Expertise tactile transférable. Le toucher impose une exploration séquentielle favorisant l'attention aux détails et à la syntaxe [29], [30]. Cette expertise tactile, forgée par l'usage quotidien du braille, se transfère vers de nouvelles interfaces spatiales [31] : les utilisateurs habitués au braille ont trouvé un système de manipulation de diagrammes chimiques tactiles significativement plus facile — spécialisation perceptive cohérente avec les théories écologiques [32].

Interopérabilité symbolique. L'accès caractère par caractère du braille offre un contrôle précis indispensable pour le débogage ou l'écriture formelle. Contrairement à un lecteur d'écran qui peut oraliser correctement une syntaxe erronée, le braille révèle l'erreur directement — la représentation tactile ne peut masquer une incohérence structurelle. Cette propriété fonde une fonction d'interopérabilité : le braille peut servir de format pivot fiable pour effectuer une traduction entre représentations formelles. La plateforme EuroMath illustre ce principe en permettant des conversions bidirectionnelles automatiques entre MathML et notations braille (UEB, BNM)

[33]. Les retours d'enseignants soulignent que le système élimine la nécessité pour eux de maîtriser le braille afin de collaborer avec des élèves aveugles — ceci est rendu possible uniquement parce que le braille agit comme *middleware* symbolique fiable permettant une traduction sans perte.

Ces observations révèlent le rôle fondamental du braille : en déchargeant la mémoire de travail et en externalisant l'information dans l'environnement, il ne se contente pas de donner accès au contenu — il transforme la nature même des opérations mentales possibles. Le braille incarne ainsi le concept de *cognitive artifact* [14] : un outil qui ne compense pas simplement une limitation, mais qui rend possibles certaines formes de raisonnement formel.

IV. IA générative et audit épistémique

Les fonctions cognitives du braille identifiées précédemment acquièrent une dimension supplémentaire critique à l'ère de l'IA générative. La fonction d'audit épistémique, esquissée dans le cadre théorique, devient particulièrement urgente face aux risques algorithmiques que nous développons ici.

A. Hallucinations algorithmiques et risques épistémiques

Les systèmes d'IA générative (LLMs, VLMs) introduisent un risque épistémique spécifique : la production fluide d'énoncés linguistiquement plausibles mais factuellement, logiquement ou structurellement erronés — les hallucinations algorithmiques [34]. Contrairement à un lecteur d'écran fidèle au texte source, ces systèmes produisent une interprétation synthétique fusionnant données sources, inférences statistiques et hallucinations, rendant opaque la distinction entre le « donné » (source) et le « construit » (interprétation générée). Ce problème est majeur dans les domaines formels, où précision symbolique et rigueur logique sont non négociables.

La littérature récente souligne des taux d'erreur préoccupants dans les systèmes automatiques de transcription et d'extraction de contenu mathématique ou graphique [22], [10]. En contexte scientifique, où une confusion entre exposant et indice (x^2 vs x_2) ou entre opérateurs ($\sum$ vs $\prod$) invalide un résultat, la moindre imprécision de ces systèmes est inacceptable. De manière analogue, lors de l'extraction de données à partir de graphiques, bien que les performances du système IA dépassent nettement celles obtenues sans assistance (48 % contre 13 % de réussite), des experts aveugles en analyse de données exigent néanmoins un accès direct aux tableaux de données brutes via leur plage braille afin de vérifier la fiabilité des descriptions générées [22]. Cette prudence méthodologique illustre un principe fondamental : le droit à une vérification indépendante.

B. Automation bias et opacité interprétative

La littérature sur l'*automation bias* montre que les utilisateurs humains tendent à accorder une confiance excessive aux systèmes automatisés, au détriment de leur vigilance critique [35], [36]. Ce phénomène devient particulièrement critique lorsque les sorties sont formulées avec assurance en langage naturel fluide — propriété caractéristique des systèmes génératifs actuels, dont les architectures transformer exhibent une densité de risque épistémique structurellement plus élevée que les approches classiques [37]. L'utilisateur se trouve alors dans une *position de dépendance interprétative*, où le récit produit est accepté sans moyens directs de vérification, en tension avec les normes épistémiques scientifiques (reproductibilité, falsifiabilité, examen par les pairs).

Cette dépendance est renforcée par l'*opacité interprétative* des systèmes. Une interaction fiable exige d'inférer un modèle mental du système — ses forces, limites et biais — introduisant une charge métacognitive significative, particulièrement pour les utilisateurs aveugles [11], [10]. L'interaction devient un exercice de décodage stratégique plutôt qu'un engagement cognitif direct avec la tâche.

C. Le braille comme infrastructure d'audit

Au regard des limites identifiées des systèmes automatisés, le rôle du braille dépasse sa seule fonction d'accès initial. Nous le conceptualisons comme une *infrastructure d'audit épistémique*, offrant une capacité matérielle et cognitive permettant de vérifier, contester, valider et reproduire de manière indépendante les résultats produits par des systèmes opaques.

Les technologies audio se révèlent structurellement inadaptées à cette fonction. L'information audio est évanescente, empêchant la comparaison simultanée nécessaire à la détection d'incohérences. Elle impose une médiation interprétative, fournissant une interprétation linguistique plutôt qu'un accès direct aux symboles bruts. Enfin, bien que certains modes permettent une lecture caractère par caractère, leur activation nécessite des interactions explicites et interrompt la fluidité, contrairement au braille où cette granularité est immédiate.

À l'inverse, le braille satisfait pleinement les critères d'un audit fiable. Il garantit persistance et stabilité, permet une inspection répétée et approfondie, offre un accès direct aux symboles sources non médiatisés et autorise une granularité maximale, avec navigation libre caractère par caractère, saut précis à une ligne ou comparaison de passages distants.

Cette fonction d'audit épistémique, formalisée comme fonction cardinale de l'Ancre dans le modèle présenté en Section V, transforme le braille de simple technologie compensatoire en infrastructure essentielle de souveraineté cognitive. Marginaliser cette capacité au nom de la modernité instaure une dépendance interprétative structurelle, constituant une forme d'injustice épistémique [38], où un agent se voit refuser la possibilité de participer pleinement à la création, à la validation et à la contestation des savoirs.

V. Le modèle de l'Ancre et du Flux

A. L'impasse de la substitution modale

Les dispositifs d'accessibilité contemporains s'inscrivent dans un paradigme implicite de *substitution modale* : rendre une information visuelle accessible consiste à la transcoder en flux audio, éventuellement enrichi par l'IA. Ce modèle repose sur un postulat profondément ancré : les modalités sensorielles, bien que physiquement distinctes, seraient cognitivement équivalentes dans leur pouvoir représentationnel.

Cette hypothèse d'équivalence cognitive est invalidée par les théories contemporaines. Selon la théorie des ressources multiples [15], la performance dépend des ressources de traitement *spécifiques* mobilisées (verbales, spatiales, visuelles), et non du seul canal sensoriel. L'esprit humain dispose de ressources distinctes et partiellement indépendantes. Deux tâches mobilisant des ressources différentes interfèrent moins que deux mobilisant la même. L'audio séquentiel sollicite principalement les ressources verbales, tandis que le braille, via le toucher et la spatialité, mobilise des ressources complémentaires. Dans les domaines formels, l'audio sature la boucle phonologique, tandis que le système haptique couplé à une représentation externe stable redistribue la charge vers les ressources spatiales et l'environnement.

Des travaux corroborent cette analyse en montrant une surcharge cognitive, une frustration accrue et une baisse de performance lorsque l'audio est l'unique modalité dans des tâches complexes [9], [11], [39]. Ces résultats révèlent les limites cognitives des modèles de substitution modale ignorant les propriétés opérationnelles distinctes des modalités.

B. Conceptualisation : spécialisation fonctionnelle

Face à l'impasse de la substitution modale, une approche alternative s'impose : reconnaître et exploiter la diversité fonctionnelle des modalités. Le modèle proposé opère cette rupture paradigmatique. Il ne s'agit plus de simplement remplacer un sens par un autre (substitution), mais de reconnaître que chaque modalité possède des forces cognitives spécifiques (spécialisation fonctionnelle) et de les articuler intelligemment pour former un système perceptivo-cognitif cohérent.

L'Ancre et **Le Flux** désignent deux régimes perceptivo-cognitifs complémentaires : l'un symbolise stabilité et point de repère, l'autre évanescence temporelle et fluidité de l'exploration. Cette tension constitutive organise le système : la valeur cognitive d'une modalité dépend de la fonction qu'elle remplit dans un système cognitif distribué (voir Figure 1).

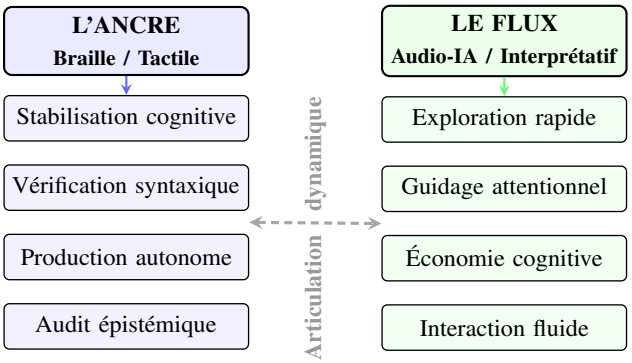


FIGURE 1 – Modèle de l'Ancre et du Flux : spécialisation fonctionnelle et complémentarité cognitive entre braille (*Ancre*) et audio-IA (*Flux*).

1) L'Ancre : infrastructure de la pensée formelle: L'Ancre désigne le régime des représentations externes *persistantes, localisables et manipulables*. Bien qu'incarné par le braille, ce concept s'étend à toute matérialisation tactile stable d'une structure symbolique. Sa puissance repose sur des propriétés fonctionnelles qui fondent ses fonctions cardinales :

— **Stabilisation cognitive** : En externalisant le stockage, l'Ancre agit comme prothèse de la mémoire de travail, permettant de maintenir des états intermédiaires et comparer des termes éloignés.
— **Vérification de précision** : La granularité caractère-par-caractère est la condition du *debugging*, de la correction syntaxique et de la détection d'anomalies.
— **Production formelle autonome** : Écrire du code, composer une formule, annoter un schéma sont des actes d'*écriture* exigeant contrôle immédiat et retour en temps réel.
— **Audit épistémique** : Fonction cruciale à l'ère algorithmique. Face à l'opacité et aux hallucinations génératives, l'Ancre offre le moyen matériel d'une vérification indépendante.

2) Le Flux : dynamique de l'exploration sémantique: Le Flux incarne le régime des représentations *évanescentes, séquentielles et interprétatives* : synthèse vocale, descriptions audio générées, dialogue avec IA. Sa caractéristique déterminante est la *fluidité interprétative*. Il excelle à parcourir, non à fixer ; à proposer du sens, non à certifier. Ses fonctions, complémentaires de l'Ancre, structurent l'exploration :

— **Exploration et orientation** : « Survol » rapide d'un paysage informationnel complexe.
— **Guidage attentionnel** : Par la prosodie ou les formulations métadiscursives, le Flux agit comme compagnon cognitif qui pointe et souligne.
— **Économie cognitive** : Résumés et explications contextuelles réduisent la charge initiale de déchiffrage.
— **Interaction fluide** : Le Flux est le milieu natif du dialogue : questionner rapidement, demander des détails, obtenir des exemples, négocier le sens de manière interactive.

L'opposition Ancre/Flux n'est pas hiérarchique, mais spécialisée. L'Ancre est le régime de la *certitude et de la fabrication* ; le Flux celui de *l'exploration et de la négociation*.

C. Postulat central : complémentarité structurelle

Nous proposons que l'Ancre et le Flux sont structurellement complémentaires et interdépendants. Leur relation n'est pas additive (audio + braille), mais *synergique*. L'efficacité cognitive optimale émerge de leur articulation dynamique et intentionnelle, pilotée par les besoins de la tâche. Cette synergie repose sur trois mécanismes :

1) **Division du travail cognitif** : Chaque régime prend en charge les opérations pour lesquelles il est optimal, minimisant l'interférence entre ressources concurrentes.
2) **Boucle de raffinement** : Cycle cognitif naturel : exploration via le Flux $\rightarrow$ vérification via l'Ancre $\rightarrow$ recontextualisation via le Flux.
3) **Redondance fonctionnelle adaptative** : Certaines fonctions peuvent être assurées par les deux régimes, offrant une robustesse et une flexibilité précieuses.

D. Conditions d'applicabilité : le continuum formel

Le modèle a été élaboré à partir des domaines formels envisagés comme *cas révélateurs*. Nous postulons que la

nécessité de l'Ancre augmente avec trois facteurs : (1) la densité symbolique du domaine, (2) l'exigence de précision syntaxique et (3) la complexité structurelle. Lorsque ces dimensions sont maximisées, la complémentarité devient critique.

Cette hypothèse suggère un continuum plutôt qu'une dichotomie. À un extrême, les textes narratifs linéaires sollicitent faiblement ces facteurs ; l'audio séquentiel suffit. À l'autre, les formalismes complexes — théorèmes, algorithmes, équations — les mobilisent fortement, rendant l'*Ancre* indispensable. Entre ces pôles, des domaines intermédiaires (philosophie analytique, rédaction juridique, notations musicales) appellent des configurations adaptées exploitant sélectivement la complémentarité.

Les domaines formels constituent le *cas critique* révélateur. Les tâches qu'ils imposent — navigation non linéaire dans des formalismes, vérification syntaxique au caractère près, manipulation récursive d'états symboliques — créent une *explosion combinatoire de la charge cognitive* dès que l'utilisateur est privé de représentation externe stable [4], [14]. Là où, dans un texte narratif, l'audio séquentiel peut suffire, dans les domaines formels son insuffisance devient une barrière épistémique. Cette asymétrie radicale révèle la complémentarité Ancre/Flux non comme option, mais comme *nécessité architecturale* de la cognition distribuée dans les domaines formels.

E. Traceurs empiriques

Le modèle se reflète dans diverses observations empiriques qualifiées de *traceurs empiriques* : elles ne constituent pas une validation systématique, mais attestent la plausibilité du cadre et sa capacité à éclairer des phénomènes documentés indépendamment. La supériorité mesurable de représentations tactiles persistantes suggère un changement de régime cognitif cohérent avec la fonction d'Ancre. Les limitations sévères de l'audio seul dans les tâches formelles [9], [39], documentées indépendamment, sont interprétables comme symptômes de l'absence d'Ancre, bien que d'autres facteurs (qualité des synthèses vocales, niveau de formation) puissent également les expliquer. Le transfert d'expertise haptique vers de nouvelles interfaces [31] corrobore l'hypothèse d'une intelligence tactile transposable. Enfin, l'exigence systématique d'audit via le braille chez les experts face à l'IA [22] illustre la fonction épistémique sur un échantillon réduit, nécessitant réplication à plus grande échelle.

F. L'articulation dynamique : le rythme de la pensée

L'innovation centrale n'est pas l'identification de deux pôles, mais l'accent sur la qualité de leur *articulation*. L'enjeu de conception n'est pas de juxtaposer plage braille et synthèse vocale, mais de permettre des *transitions fluides, rapides et réversibles* entre régimes, en phase avec le rythme de la pensée.

Exemple : un développeur aveugle débogue une fonction Python. Il *explore* d'abord la structure du code via une synthèse vocale accélérée (Flux) pour localiser la région suspecte. Il *bascule* vers sa plage braille pour inspecter caractère par caractère la syntaxe de la ligne incriminée (Ancre), détectant une confusion entre = (affectation) et == (comparaison), que l'audio prononce identiquement comme « égal » mais que le toucher distingue immédiatement. Il *corrige* directement sur la plage braille (production autonome), puis *re-contextualise* via audio pour vérifier l'impact sur la logique globale (Flux). Cette séquence Flux→Ancre→Ancre→Flux, pilotée par les besoins de la tâche, illustre la spécialisation fonctionnelle et l'articulation dynamique au cœur du modèle.

Cette articulation est observable dans les pratiques expertes. Des travaux sur les professionnels aveugles révèlent qu'ils alternent spontanément entre *exploration auditive globale* d'un diagramme (Flux) et *confirmation tactile précise* des relations structurelles entre éléments du diagramme (Ancre) [23]. Cette alternance matérialise le cycle de raffinement propre au raisonnement formel. Concevoir pour cette articulation, c'est concevoir pour le rythme même de la cognition experte.

VI. Principes normatifs dérivés du modèle

Le modèle conduit à quatre principes de conception, traduisant le cadre théorique en orientations opérationnelles.

A. Principe 1 : Garantir l'accès aux sources brutes

Toute information produite ou transformée par un système automatisé devrait demeurer accessible sous une forme symbolique persistante, complète et directement manipulable via du braille. Cette exigence relève de la fonction d'audit épistémique : compte tenu des taux d'erreur documentés, la vérification indépendante est impérative. Sans accès direct aux sources, l'utilisateur est placé en dépendance interprétative, incompatible avec les exigences scientifiques de vérification et de reproductibilité. Cela implique des interfaces permettant l'export vers des formats braille standardisés, l'affichage des données sources en regard de toute visualisation synthétique, ainsi qu'une synchronisation précise entre point de lecture audio et position sur la plage braille.

B. Principe 2 : Reconnaître la spécialisation fonctionnelle

La conception des interfaces devrait reconnaître et exploiter la spécialisation fonctionnelle. Plutôt que permettre indifféremment toutes actions sur tous canaux, les systèmes devraient tirer parti des avantages comparatifs de chaque modalité. Les tâches qui exigent précision syntaxique (débogage, vérification) ou production formelle autonome sont particulièrement adaptées au canal tactile/braille. Ce principe s'appuie sur les preuves empiriques de gains substantiels et s'ancre théoriquement dans le modèle des ressources multiples de Wickens (Section V). Concrètement, cela suppose la création d'éditeurs spécialisés avec navigation granulaire optimisée pour le braille, et la reconnaissance institutionnelle que, pour certains actes cognitifs fondamentaux, le braille constitue le mode optimal plutôt qu'une simple alternative.

C. Principe 3 : Assurer la fluidité modale

L'efficacité cognitive du modèle exige des transitions fluides et rapides entre audio et braille, sans perte de contexte ni charge additionnelle due au changement de canal. Une articulation défaillante compromet la complémentarité fonctionnelle et annule les bénéfices de la spécialisation en alourdissant excessivement

le coût du changement modal. Le temps perdu en manipulations techniques se soustrait directement au temps consacré à la tâche cognitive elle-même. Cela requiert un curseur unifié (le focus sur la plage braille déplace automatiquement le point de lecture audio, et vice-versa), la conservation des états de l'interface lors des transitions, et des raccourcis pour basculer entre modalités selon les besoins de la tâche. Cette fonctionnalité, présente dans certaines technologies d'assistance, demeure insuffisamment développée dans les contextes scientifiques où la synchronisation fine est cruciale.

D. Principe 4 : Viser l'équité cognitive

L'objectif de l'accessibilité dépasse l'accès compensatoire à l'information. Il s'agit de viser l'équité cognitive : capacité d'exercer les actes fondamentaux de la pratique scientifique — vérifier, calculer, éditer, contester, produire et valider. Ce principe, s'inscrivant dans une réflexion sur la justice épistémique, s'appuie sur les corrélations documentées entre littératie braille et participation aux professions qualifiées. En pratique, cela suppose la fourniture systématique de traces d'audit accessibles (historique des transformations opérées par l'IA), le choix de formats d'export interopérables permettant la reprise du travail, l'accessibilité intégrale de la documentation technique, et le développement de métriques d'évaluation mesurant la capacité à accomplir ces actes cognitifs fondamentaux.

E. Synthèse

Ces principes forment un système cohérent : l'accès aux sources (P1) permet la vérification indépendante, soutenue par la spécialisation fonctionnelle (P2) et optimisée par la fluidité modale (P3). Ensemble, ils visent une équité cognitive (P4) dépassant l'accès compensatoire, et rompent avec la logique de substitution par une complémentarité cognitive intentionnelle.

VII. Discussion et implications

L'intégration du braille dans les logiciels scientifiques apparaît comme un besoin critique. Les interfaces bi-modales, permettant une articulation fluide entre exploration audio et vérification braille, devraient devenir la norme – une analyse empirique de 66 systèmes d'accessibilité STEM montre que les approches intégratives, articulant modalités sans les juxtaposer, surpassent les approches additives sur la charge cognitive [40]. Le développement d'APIs standardisées pour l'export vers des formats braille faciliterait l'interopérabilité. Face aux limites de l'IA générative, les systèmes devraient offrir des mécanismes de vérification indépendante via un accès braille aux sources, avec des journaux de transformation accessibles.

Ces implications technologiques rejoignent des enjeux éducatifs. La corrélation entre braille et réussite professionnelle suggère de renforcer son enseignement dans les cursus scientifiques. Une approche bi-modale, développant compétences audio et braille et leur complémentarité, paraît appropriée. La formation des enseignants spécialisés aux fondements cognitifs de cette complémentarité permettrait une pédagogie informée. La reconnaissance du braille comme infrastructure cognitive essentielle devrait guider l'allocation de ressources et l'évolution des standards d'accessibilité.

Ces orientations se heurtent néanmoins à plusieurs points de tension. (1) *Coût économique* : les plages braille restent coûteuses (500 à 15 000 euros). Toutefois, les prix décroissent avec l'évolution technologique, et le coût doit être comparé aux alternatives : dépendance à des services d'assistance, perte de productivité, et barrières à l'emploi. L'investissement se justifie par les corrélations documentées entre maîtrise avancée du braille et emploi [21], [7], [8]. (2) *Difficulté d'apprentissage tardif* : le braille serait trop complexe à acquérir à l'âge adulte. Or, des études montrent des acquisitions réussies chez des adultes motivés, notamment en contexte professionnel, où la littératie préalable et la motivation facilitent l'apprentissage [41], [42], avec des bénéfices à long terme justifiant l'investissement initial. (3) *Déficiences combinées* : certaines personnes présentent des limitations tactiles additionnelles. Le modèle reconnaît ces situations, tout en soutenant que, lorsque l'accès au braille est possible, la complémentarité des modalités demeure pertinente.

Bien que théorique, le modèle appelle des validations empiriques selon trois axes : études expérimentales en conditions contrôlées, développement de prototypes bi-modaux, et investigations neurocognitives sur le traitement haptique en contexte formel. Des protocoles avec des cohortes plus larges sont nécessaires pour estimer la prévalence et l'ampleur des effets postulés, et la viabilité technologique, sociale et économique devra être examinée pour traduire ces principes en applications durables. Enfin, des contextes impliquant densité symbolique ou précision syntaxique — rédaction juridique, notations musicales, philosophie analytique — constituent des terrains d'extension naturels.

VIII. Conclusion

Face à la marginalisation du braille au profit des solutions audio-IA, le modèle de l'Ancre et du Flux propose un cadre alternatif au paradigme de substitution modale. Dans les domaines formels, la complémentarité braille-audio n'est pas un confort mais une nécessité architecturale : sans représentation externe stable, la cognition formelle subit une explosion combinatoire de charge. L'enjeu dépasse la technologie d'assistance : il s'agit de souveraineté cognitive. À l'ère de l'IA générative, le droit à la vérification indépendante conditionne la participation pleine à la production scientifique. Déléguer sans réserve cette vérification à des systèmes opaques et faillibles n'est pas une modernisation de l'accessibilité — c'est une régression épistémique. Le braille, loin d'être un héritage à dépasser, constitue précisément l'infrastructure qui rend cette vérification possible. L'équité ne réside pas dans l'uniformisation des modalités, mais dans l'exploitation rigoureuse de leurs complémentarités. Cette perspective invite à repenser l'accessibilité non comme compensation mais comme architecture cognitive intentionnelle — condition de la citoyenneté scientifique à l'ère algorithmique.

Remerciements

Ce travail s'inscrit dans le projet COOBRA, financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-24-SARP-0006).

RÉFÉRENCES

[1] WebAIM, "Screen reader user survey #8 results," 2019, consulté le 21 février 2026. [Online]. Available : https://webaim.org/projects/screenreadersurvey8/

[2] R. M. Sheffield, F. M. D'Andrea, V. Morash, and S. Chatfield, "How many braille readers ? policy, politics, and perception," *Journal of Visual Impairment & Blindness*, vol. 116, no. 1, pp. 14–25, 2022.

[3] A. Clark and D. Chalmers, "The extended mind," *Analysis*, vol. 58, no. 1, pp. 7–19, 1998.

[4] J. Zhang and D. A. Norman, "Representations in distributed cognitive tasks," *Cognitive Science*, vol. 18, no. 1, pp. 87–122, 1994.

[5] American Printing House for the Blind, "Annual report 2023 : Statistical overview of students served," American Printing House for the Blind, Tech. Rep., 2023. [Online]. Available : https://www.aph.org/annual-report/

[6] Royal National Institute of Blind People, "Braille 200 : Key statistics and trends 2024," Royal National Institute of Blind People, Tech. Rep., 2024. [Online]. Available : https://www.rnib.org.uk/braille-statistics

[7] R. Ryles, "The impact of braille reading skills on employment, income, education, and reading habits," *Journal of Visual Impairment & Blindness*, vol. 90, no. 3, pp. 219–226, 1996.

[8] E. C. Bell and N. M. Mino, "Employment outcomes for blind and visually impaired adults," *Journal of Blindness Innovation and Research*, vol. 5, no. 2, 2015.

[9] K. Dumkasem, P. Srisingchai, and P. Rattanatamrong, "EyeMath : Increasing accessibility of mathematics to visually impaired readers," in *2019 23rd International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC)*. IEEE, 2019, pp. 197–202.

[10] K. Anderer, K. Müller, L. Strobel, M. Wölfel, J. Niehues, and K. Gerling, "Making lecture videos accessible for students who are blind or have low vision through AI-assisted navigation and visual question answering," in *Proceedings of the 27th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (ASSETS '25)*. ACM, 2025, pp. 1–15.

[11] R. Adnin and M. Das, ""I look at it as the king of knowledge" : How blind people use and understand generative AI tools," in *Proceedings of the 26th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (ASSETS '24)*. ACM, 2024, pp. 1–14.

[12] A. D. N. Edwards, H. McCartney, and F. Fogarolo, "Lambda : A multimodal approach to making mathematics accessible to blind students," in *Proceedings of the 8th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (ASSETS '06)*. ACM, 2006, pp. 48–54.

[13] E. Hutchins, *Cognition in the Wild*. Cambridge, MA : MIT Press, 1995.

[14] D. A. Norman, "Cognitive artifacts," in *Designing Interaction : Psychology at the Human-Computer Interface*, J. M. Carroll, Ed. Cambridge University Press, 1991, pp. 17–38.

[15] C. D. Wickens, "Multiple resources and mental workload," *Human Factors*, vol. 50, no. 3, pp. 449–455, 2008.

[16] Collectif Homère, "Étude nationale sur la déficience visuelle en france : maîtrise et usage du braille," Collectif Homère, France, Tech. Rep., 2024, consulté le 15 février 2026. [Online]. Available : https://www.creaicentre.org/images/EVENEMENTS_NATIONAUX/Rapport_Homere_20230214.pdf

[17] European Blind Union, "Braille in europe : Position paper," 2012. [Online]. Available : http://www.euroblind.org

[18] D. P. Wormsley, *Braille Literacy : A Functional Approach*, F. M. D'Andrea, Ed. American Foundation for the Blind Press, 2004.

[19] K. A. Erickson and D. Hatton, "Literacy and visual impairment," *Seminars in Speech and Language*, vol. 28, no. 1, pp. 58–68, 2007.

[20] S. J. Spungin, *Braille Literacy : Issues for Blind Persons, Families, Professionals, and Procedures of Braille*. American Foundation for the Blind, 1989.

[21] M. C. McDonnall, A. Steverson, J. Boydstun, and F. M. D'Andrea, "Factors associated with proficient braille skills in adults," *Journal of Visual Impairment & Blindness*, vol. 119, no. 2, pp. 97–108, 2025.

[22] J. Choi, S. Jung, D. G. Park, J. Choo, and N. Elmqvist, "Visualizing for the non-visual : Enabling the visually impaired to use visualization," in *Computer Graphics Forum (Proceedings of EuroVis 2019)*, vol. 38, no. 3, 2019, pp. 249–260.

[23] I. Wildhaber and D. Archambault, "Diagram tags : Audio-tactile diagrams for the blind," in *Computers Helping People with Special Needs (ICCHP 2020)*, ser. Lecture Notes in Computer Science, vol. 12377. Springer, 2020, pp. 401–408.

[24] D. Kirsh, "Thinking with external representations," *AI & Society*, vol. 25, no. 4, pp. 441–454, 2010.

[25] M. Wilson, "Six views of embodied cognition," *Psychonomic Bulletin & Review*, vol. 9, no. 4, pp. 625–636, 2002.

[26] B. Tversky, "Cognitive maps, cognitive collages, and spatial mental models," in *Spatial Information Theory : A Theoretical Basis for GIS*, ser. Lecture Notes in Computer Science, A. U. Frank and I. Campari, Eds. Springer, 1993, vol. 716, pp. 14–24.

[27] N. Cowan, "The magical number 4 in short-term memory : A reconsideration of mental storage capacity," *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 24, no. 1, pp. 87–114, 2001.

[28] H. A. Simon, *The Sciences of the Artificial*, 3rd ed. Cambridge, MA : MIT Press, 1996.

[29] R. L. Klatzky and S. J. Lederman, "The intelligent hand," in *The Psychology of Learning and Motivation*, G. H. Bower, Ed. Academic Press, 1987, vol. 21, pp. 121–151.

[30] S. J. Lederman and R. L. Klatzky, "Hand movements : A window into haptic object recognition," *Cognitive Psychology*, vol. 19, no. 3, pp. 342–368, 1987.

[31] S. Wegwerth, C. Goncu, and K. Marriott, "KASI : A tangible kit for accessible STEM information," in *Proceedings of the 25th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (ASSETS 2023)*. ACM, 2023, pp. 1–15.

[32] J. J. Gibson, *The Ecological Approach to Visual Perception*. Boston, MA : Houghton Mifflin, 1979.

[33] D. Fitzpatrick, A. Nazemi, and G. Terlikowski, "EuroMath : A web-based platform for teaching of accessible mathematics," in *Computers Helping People with Special Needs (ICCHP 2020)*, ser. Lecture Notes in Computer Science, vol. 12376. Springer, 2020, pp. 385–392.

[34] Z. Ji, N. Lee, R. Frieske, T. Yu, D. Su, Y. Xu, and P. Fung, "Survey of hallucination in natural language generation," *ACM Computing Surveys*, vol. 55, no. 12, pp. 1–38, 2023.

[35] R. Parasuraman and V. Riley, "Humans and automation : Use, misuse, disuse, abuse," *Human Factors*, vol. 39, no. 2, pp. 230–253, 1997.

[36] M. T. Dzindolet, S. A. Peterson, R. A. Pomranky, L. G. Pierce, and H. P. Beck, "The role of trust in automation reliance," *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 58, no. 6, pp. 697–718, 2003.

[37] M. Sadallah and B. Encelle, "The verification gap in AI accessibility : A meta-analysis of architectural paradigms and agency deficits," in *Proceedings of the 23rd International Web for All Conference (W4A'26)*. ACM, 2026.

[38] M. Fricker, *Epistemic Injustice : Power and the Ethics of Knowing*. Oxford University Press, 2007.

[39] C. Jung, S. Mehta, A. Kulkarni, Y. Zhao, and Y.-S. Kim, "Communicating visualizations without visuals : Investigation of visualization alternative text for people with visual impairments," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 28, no. 1, pp. 1095–1105, 2021.

[40] M. Sadallah and B. Encelle, "Beyond additive design : An empirical taxonomy of multimodal STEM accessibility systems," in *Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '26)*. ACM, 2026.

[41] K. Siuda-Krzywicka, Ł. Bola, M. Paplińska, E. Sumera, K. Jednoróg, A. Marchewka, M. W. Śliwińska, A. Amedi, and A. Caclin, "Braille in the sighted : Teaching tactile reading to sighted adults," *PLOS ONE*, vol. 11, no. 5, p. e0155394, 2016.

[42] N. Martiniello, L. Harisanati, and W. Wittich, "Enablers and barriers encountered by working-age and older adults with vision impairment who pursue braille training," *Disability and Rehabilitation*, vol. 44, no. 11, pp. 2347–2362, 2022.