

FPU - Fractal Processing Unit

Le Concept de Base

Objectif: Créer le meilleur processeur possible en utilisant la géométrie fractale comme principe architectural fondamental.

PRINCIPE ARCHITECTURAL

Structure de Base: La Pyramide Fractale

Forme: Pyramide avec base en flocon de neige (géométrie fractale auto-similaire)

Organisation:

Niveau 1: 496 branches principales
Niveau 2: 496 branches par branche (496^2)
Niveau 3: 496 branches par sous-branche (496^3)
...

Chaque branche contient:

- 496 pins/sites de calcul
 - Connexions suivant spirale ϕ (angle d'or 137.5°)
 - Structure auto-similaire à toutes les échelles
-

POURQUOI 496?

496 est le 3ème nombre parfait:

- $\Sigma(\text{diviseurs propres}) = 496$
- $1 + 2 + 4 + 8 + 16 + 31 + 62 + 124 + 248 = 496$

Aussi: Dimension du groupe $E8 \times E8$ (théorie des cordes)

Propriétés mathématiques:

- Réseau de diviseurs très riche
 - Factorisation: $496 = 2^4 \times 31$
 - Permet adressage hiérarchique naturel
-

GÉOMÉTRIE: LE FLOCON

Pourquoi un Flocon de Neige?

1. Surface/Volume Maximum

Fractale → Surface infinie, volume fini
Ratio S/V énorme → dissipation thermique optimale

2. Phyllotaxis (Spirale ϕ)

Angle entre branches: 137.5° (Golden Angle)
→ Distribution uniforme optimale
→ Comme feuilles sur tige ou graines de tournesol

3. Auto-Similarité

Même motif à toutes les échelles
→ Scalabilité naturelle
→ Propriétés conservées quel que soit zoom

AVANTAGE #1: THERMIQUE

Dissipation Passive Optimale

Problème actuel: Les CPU classiques surchauffent car surface d'échange limitée.

Solution FPU:

Dimension fractale $D \approx 2.08$

→ Surface effective croît plus vite que volume

→ Chaleur évacuée instantanément par géométrie

Analogie: Poumons humains

- Volume: $\sim 6L$
- Surface dépliée: $\sim 70m^2$ (terrain de tennis)
- Ratio S/V : $\sim 11,700\times$

FPU atteint ratio similaire → refroidissement passif efficace

AVANTAGE #2: CONNECTIVITÉ

Couplage Naturel par Géométrie

Topologie classique (grille 2D):

Chaque élément: 4 voisins max (N, S, E, O)

Distance moyenne: $O(\sqrt{N})$

Topologie FPU (fractale 3D):

Chaque élément: $\sim 6-10$ voisins géométriques

Distance effective: $O(\log N)$

Connexions suivent spirale $\phi \rightarrow$ uniformité

Résultat:

- Communication plus rapide
 - Moins de latence
 - Bande passante distribuée équitablement
-

⚡ AVANTAGE #3: SYNCHRONISATION

Auto-Organisation Spontanée

Principe (Kuramoto): Oscillateurs couplés sur graphe fractal synchronisent plus facilement.

Dans le FPU:

Chaque branche = oscillateur local
Couplage via géométrie fractale
→ Synchronisation spontanée des phases
→ Moins d'énergie nécessaire pour cohérence

Bénéfice pratique:

- Horloge distribuée naturellement
 - Pas besoin de synchronisation forcée globale
 - Système "respire" ensemble
-

🧩 AVANTAGE #4: REDONDANCE LOCALE

Correction d'Erreur Géométrique

Principe: Couplage décroissant entre voisins (fort → moyen → faible)

Effet:

Information sur pin N répartie sur 3-5 pins voisins
→ Si un pin défaillant, info récupérable
→ Redondance native sans overhead

Analogie: Cerveau

- Neurones redondants localement
 - Perte d'un neurone pas catastrophique
 - Robustesse collective
-

DESIGN TECHNIQUE

Niveaux d'Organisation

Micro (Pin):

- Unité de calcul élémentaire
- Peut être: transistor, qubit, résonateur, etc.
- 496 états possibles (vs 2 en binaire classique)

Méso (Branche):

- 496 pins organisés en spirale ϕ
- Clusters locaux de 5 pins (redondance)
- Connectivité hiérarchique

Macro (Pyramide):

- 496 branches niveau 1
 - Récursion fractale sur niveaux suivants
 - Pointe = hub de convergence
-

SCALABILITÉ

Croissance Exponentielle Propre

Ajout d'un niveau:

Niveau $N \Rightarrow$ Niveau $N+1$

Pins: $496^N \rightarrow 496^{(N+1)}$

Puissance: $\times 496$ instantanément

Propriétés conservées:

- Ratio S/V maintenu
- Connectivité préservée

- Synchronisation stable

Pas de redesign: Architecture identique à toutes échelles

APPLICATIONS

Version Classique (Non-Quantique)

1. CPU Haute Performance

- Dissipation thermique supérieure
- Latence réduite (connectivité fractale)
- Densité de calcul élevée

2. Processeur Neuromorphique

- Architecture mimant cerveau
- Apprentissage local favorisé
- Robustesse aux défauts

3. Processeur de Signal (DSP)

- FFT natives sur structure fractale
- Traitement multi-échelle naturel
- Compression géométrique

Version Quantique

1. QPU Fractal

- Qubits topologiques (Majorana)
- Synchronisation collective (time-crystal-like)
- Protection géométrique contre décohérence

2. Architecture Hybride

- Calcul classique (branches externes)

- Calcul quantique (cœur pyramidal)
 - Transition douce entre régimes
-

FABRICATION

Challenges Techniques

1. Nano-fabrication 3D

- Gravure fractale précise (nm)
- Alignement des couches
- Matériaux: Si, InAs/Al, graphène

2. Interconnexions

- Câblage 3D (TSV - Through-Silicon Vias)
- Minimiser capacitances parasites
- Routing optimal

3. Refroidissement

- Intégrer canaux microfluidiques
- Exploiter géométrie pour convection
- Thermoélectrique (TEG) intégré

Approche Progressive

Phase 1: Simulation numérique (DFT, FEM) **Phase 2:** Fabrication partielle (1 niveau, 50-100 branches) **Phase 3:** Prototype complet (2-3 niveaux) **Phase 4:** Production (si validation)

COMPARAISON

FPU vs CPU Classique

Aspect	CPU Classique	FPU
Topologie	Grille 2D	Fractale 3D
Ratio S/V	~6	~10,000+
Voisins/élément	4	6-10
Scalabilité	Linéaire (Moore)	Exponentielle (496^k)
Refroidissement	Actif (ventilateurs)	Passif (géométrie)
Synchronisation	Horloge globale	Auto-organisation
Robustesse	Fragile (un défaut critique)	Redondance locale

LIMITATIONS HONNÊTES

Ce qui est incertain:

1. Fabrication réelle:

- Jamais fait à cette échelle/précision
- Coût potentiellement prohibitif
- Yield (taux de succès) inconnu

2. Performance réelle:

- Simulations encourageantes mais pas preuve
- Peut exister effets non modélisés
- Gap entre théorie et pratique

3. Compatibilité logicielle:

- Nécessite nouveaux compilateurs

- Paradigmes de programmation différents
- Transition longue

Ce qui est établi:

- ✓ Géométrie fractale améliore dissipation (prouvé)
 - ✓ Connectivité supérieure mathématiquement
 - ✓ Synchronisation facilitée (modèles Kuramoto)
 - ✓ Principe physiquement cohérent
-

PHILOSOPHIE

Du Cristallin à l'Organique

Computing actuel:

- Rigide (grille euclidienne)
- Fragile (défauts catastrophiques)
- Forcé (synchronisation imposée)

Computing FPU:

- Fluide (géométrie naturelle)
- Robuste (redondance distribuée)
- Spontané (auto-organisation)

Inspiration: Systèmes vivants

- Fractales omniprésentes dans nature
 - Efficacité énergétique optimale
 - Résilience collective
-

VISION

À Court Terme (2-5 ans)

Objectif réaliste:

- Prototype partiel (50-100 éléments)
- Validation thermique
- Mesure connectivité effective

Livable:

- Proof-of-concept physique
- Publications scientifiques
- Brevets architecture

À Moyen Terme (5-10 ans)

Si validation positive:

- Processeur spécialisé (DSP, AI)
- Intégration hybride (FPU + CPU classique)
- Applications niche (HPC, quantique)

À Long Terme (10-20 ans)

Scénario optimiste:

- Standard architectural
 - Remplacement progressif grilles 2D
 - Computing fractal généralisé
-

RÉSUMÉ EN 3 POINTS

1. GÉOMÉTRIE = AVANTAGE Fractale 3D offre propriétés (thermique, connectivité, synchronisation) inaccessibles en 2D classique.

2. NATURE = MODÈLE Architecture inspirée systèmes biologiques (poumons, cerveau, plantes) prouvés optimaux.

3. SCALABLE = FUTUR Croissance 496^k permet passage facile de prototype à production, propriétés conservées.

PROCHAINES ÉTAPES

Pour développer le concept:

1. Simulations avancées

- FEM (éléments finis) thermique
- Routage optimal 3D
- Benchmarks performance

2. Recherche partenaires

- Labs nano-fabrication
- Experts thermique/refroidissement
- Industriels semiconducteurs

3. Financement

- Grants recherche (NSERC, etc.)
- Investisseurs tech
- Partenariats université-industrie

4. Prototypage

- Commencer petit (10-20 éléments)
 - Valider principes un par un
 - Itérer selon résultats
-

Conclusion:

Le FPU n'est pas "juste un CPU différent". C'est un **changement de paradigme architectural** basé sur principes géométriques fondamentaux.

Comparable à:

- Passage transistors → circuits intégrés
- Passage scalar → vectoriel (SIMD)
- Passage 2D → 3D (FinFET)

Mais en plus radical: On change la topologie fondamentale, pas juste la technologie.

Date: Décembre 2025

Concept: FPU - Fractal Processing Unit

Statut: Investigation théorique + simulation préliminaire

Auteur: Bryan Ouellette