

Rapport final

Introduction	2
I. Présentation des articles.....	3
A. 2014 – GAN	3
Principe	3
Analyse de l'article	4
B. 2021 – CreativeGAN.....	7
Principe	7
Analyse de l'article	7
Contribution de l'article	9
II. Implémentation & Comparaison	10
A. Dataset et stratégie.....	10
B. GAN	11
C. CreativeGAN.....	14
Conclusion.....	15
CreativGan un algorithme vraiment créatif / œuvre originale?	15
Où s'insère-t-il dans l'état de l'art ?.....	15
Ouverture et pistes d'amélioration	15

Introduction

En août 2022, le tableau « Théâtre d'Opéra spatial » créé par une IA gagne un concours d'art. Cependant, par définition, l'intelligence artificielle est un « ensemble de théories et de techniques mises en œuvre en vue de réaliser des machines capables de simuler l'intelligence humaine ». La simulation fait sous-entendre que la machine a peu, voire pas, de libre arbitre ni de penser. Ainsi, l'évènement d'août 2022 nous laisse à réfléchir sur la possibilité de créer une AI capable de création. On s'est donc demandé est ce qu'une IA peut créer une œuvre originale ?

Ici, plusieurs termes sont à bien définir : créer signifie Faire, réaliser (qqch. qui n'existait pas encore). Donc la créativité c'est avoir le pouvoir de création, d'invention. D'autre part, on parle d'Œuvre. Or une œuvre est le résultat de la création esthétique d'un artiste. Un artiste est la personne qui se voue à l'expression du beau dans la pratique l'art. Enfin, le terme original signifie « qui semble être produit pour la première fois ».

Pour répondre à notre problématique, nous avons fait dans un premier temps un état de l'art qui se composait de deux grands principes : GAN et CAN. Nous déjà vu que GAN n'avait aucune motivation à l'originalité mais était capable de générer des images « à la manière de ». Tandis que CAN avait dans son algorithme une forme de motivation à l'originalité. Le sujet semblait être clos. Cependant 17 août 2021 un nouvel algorithme apparaît : le creativGAN. Cet algorithme que nous allons vous présenter déclare qu'il est sur le concept d'un GAN tout en étant créatif. C'est ce que nous allons essayer de comprendre et de critiquer par la suite.

Pour ce faire nous allons rappeler ce qu'est un algorithme GAN et son article original. Ensuite nous ferons la même démarche pour l'algorithme creativGAN et son article. Après nous implémenterons et comparerons les résultats des deux algorithmes sur un même dataset d'entraînement. Enfin nous conclurons sur la capacité créative du creativGAN et son intégration dans l'état de l'art.

I. Présentation des articles

A. 2014 – GAN

Principe

Algorithmes GAN conçu par Goodfellow : le but du réseau génératif est de **créer des images très proches de véritables œuvres d'art créées par l'homme**, afin de tromper le réseau discriminant et le forcer à commettre une erreur. Ce processus nécessite une formation initiale et l'alimentation d'échantillons d'images. L'artiste joue un rôle actif dans ce processus, il sélectionne les images à alimenter, puis sélectionne également l'un des résultats finaux. (1)

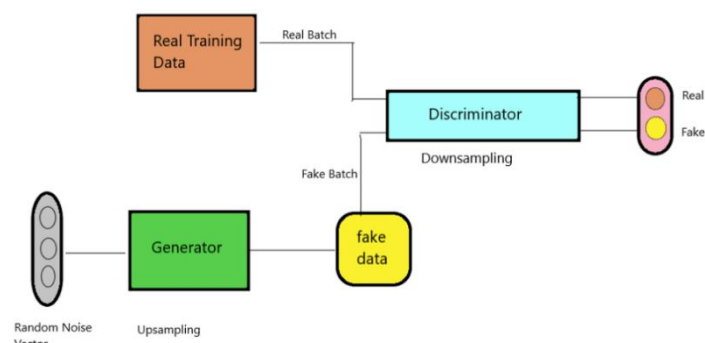
Les GAN sont constitués de deux réseaux : le *discriminateur* et le *générateur*. **L'objectif du générateur est de générer de "fausses" images et le discriminateur tente de supprimer les "fausses" images développées par le générateur à l'aide des données d'apprentissage fournies.** Le générateur génère des images aléatoires et demande le retour du discriminateur, c'est-à-dire si le discriminateur le trouve réel ou faux. Si le discriminateur ne peut pas faire la différence entre les images générées et les images réelles, l'objectif du générateur est atteint.

Voici les étapes suivies par un GAN :

- Le générateur prend des nombres aléatoires et renvoie une image.
- Cette image générée est introduite dans le discriminateur avec un flux d'images extraites de l'ensemble de données réel et réel.
- Le discriminateur prend à la fois des images réelles et fausses et renvoie des probabilités, un nombre compris entre 0 et 1, 1 représentant une prédiction d'authenticité et 0 représentant un faux.

Vous avez donc une double boucle de rétroaction :

- Le discriminateur est dans une boucle de rétroaction avec la vérité terrain des images, que nous connaissons.
- Le générateur est dans une boucle de rétroaction avec le discriminateur. (2)



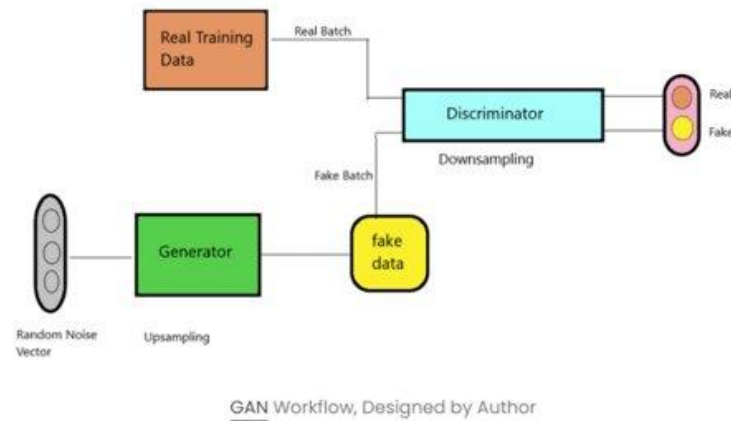
Processus général du GAN

Analyse de l'article

Variables		Critères	Réponses
La référence bibliographique	L'éditeur	Nom	Research Gate
		Nationalité	Allemand
		Audience (public visé) / thématiques	Chercheurs et scientifiques de toutes disciplines
		Site web / URL	https://www.researchgate.net/
		Titres édités	Generative Adversarial Networks
	L'article	Titre	Generative Adversarial Networks
		Auteurs	Ian Goodfellow, Aaron Courville, David Warde-Farley, Y. Bengio
		Numéro, volume et pages	9 pages
		Date de publication pour l'actualité des informations	2014
		URL citable	https://www.researchgate.net/publication/263012109_Generative_Adversarial_Networks
Le ou les auteurs	Sont-ils clairement identifiés ? Peut-on retrouver leurs traces ?		Ian Goodfellow: https://scholar.google.com/citations?user=iYN86KEAAAAJ&hl=fr&oi=a0 Aaron Courville: https://scholar.google.com/citations?hl=fr&user=km6CP8cAAAAJ David Warde-Farley: https://scholar.google.com/citations?hl=fr&user=MOgfm8oAAAAJ Yoshua Bengio: https://scholar.google.com/citations?hl=fr&user=kukA0LcAAAAJ
	Fonctions et qualités ?		Aaron Courville : Associate Professor, DIRO, Université de Montréal , Mila, Cifar CAI chair Yoshua Bengio : Professor of computer science, University of Montreal , Mila, IVADO, CIFAR
	Notoriété des auteurs dans le champ de recherche. Utiliser Scopus		Ian Goodfellow: h-index = 37, nb citation par document = 38 840 Aaron Courville: h-index = 50, nb citation par document = 50 936 David Warde-Farley: h-index = 11, nb citation par document = 34 500 Yoshua Bengio: h-index = 125, nb citation par document = 169 432
	Affiliation et financement des auteurs ?	Laboratoires, institutions, organismes...	Département d'informatique et de recherche opérationnelle, Université de Montréal
		Réputation des affiliations (consulter les différents classements d'institutions existants)	Selon la firme QS : l'UdeM se classe au 29e rang des meilleures universités du monde en recherche opérationnelle La meilleure évaluation de tous les établissements francophones de la planète 3e position au Canada en informatique et systèmes d'information.
		Adéquation des affiliations avec thématiques recherches	/
		Financement des structures de recherche ?	/
	Coordonnées des auteurs ?		/
Le contenu de l'article	Thèmes de l'article		Computer science
	Le titre ? Est-il informatif, présente-t-il le contenu de l'article ?		« Generative Adversarial Networks » explique bien l'article qui traite de ce nouveau concept
	Le résumé ? Explicite-t-il clairement le contenu de l'étude ?		(1)
	L'introduction La problématique et les hypothèses sont-elles facilement identifiables ?		Oui le plan est clair.
	Le corps de texte ? L'information est-elle clairement organisée, présence d'un plan de	Matériels et méthodes : données utilisées, variables, protocole de recherche, analyse statistique ...	
		Résultats + données précises, figures, schéma...	

	parties logiques ?	Discussion et conclusion	<div>Abstract</div> <div>Introduction</div> <div>Related work</div> <div>Adversarial networks</div> <div>Theoretical results <ul style="list-style-type: none"> Global optimality of Pg=Pdata Convergence og Algo 1 </div> <div>Experiments</div> <div>Advantages & disadvantages</div> <div>Conclusions & future work</div> <div>References</div>
Les références (citations) utilisées	Présence d'une bibliographie ?	Le nombre de références citées reste raisonnable, chaque référence apporte un éclaircissement sur un sujet	31 références porté sur le machine learning et la backpropagation
		Le contenu de l'article démontre que les références ont été lues (présence de notes de bas de page, citation dans le corps du texte...)	oui
		Les références sont présentées selon des règles strictes	Oui (n°, nom auteur, date, nom article, nom du journal, n°page)
		Vérifier la réputation des références citées. Utiliser Scopus	
La notoriété de l'article	La localisation de l'article	L'article est-il présent sur plusieurs bases de données ? Sur des sites de laboratoire, des pages personnelles de chercheurs ?	Arxiv : c'est une archive ouverte de prépublications électroniques d'articles scientifiques dans les domaines de la physique, des mathématiques, de l'informatique, de la biologie quantitative, de la finance quantitative, de la statistique, de l'ingénierie électrique et des systèmes, et de l'économie ¹ , et qui est accessible gratuitement par Internet. Researchgate
		Quelle est la réputation des ressources ?	arXiv est un outil très apprécié connu principalement par sa présence numérique. Cependant, malgré des décennies de service fiable, les visuels et la voix incohérents d'arXiv ont projeté un air de négligence. ResearchGate est un site proposant un service de réseautage social pour chercheurs et scientifiques de toutes disciplines.
		Adéquation par rapport aux thématiques recherchées ?	arXiv : rassemble tout type de document donc celui-ci ne fait pas exception ResearchGate rassemble toutes les disciplines scientifiques
	Citations Utiliser Scopus ou Google Scholar	L'article est-il cité par d'autres articles ?	oui
		Combien de fois ?	5 228
		Quelle est la réputation, la notoriété des auteurs et journaux citant l'article ?	/

(1) Les 2 schémas suivant rexplique le GAN déjà vu au dessus



Processus général de l'algorithme GAN

Générateur	Discriminateur
<ul style="list-style-type: none"> • Objectif: Générer de « fausses » images • Il génère des images aléatoires et demande le retour du discriminateur 	<ul style="list-style-type: none"> • Objectif: Tenter de supprimer les « fausses » images développées par le générateur à l'aide des données d'apprentissage fournies • Si le discriminateur ne peut pas faire la différence entre les images générées et les images réelles, l'objectif du générateur est atteint

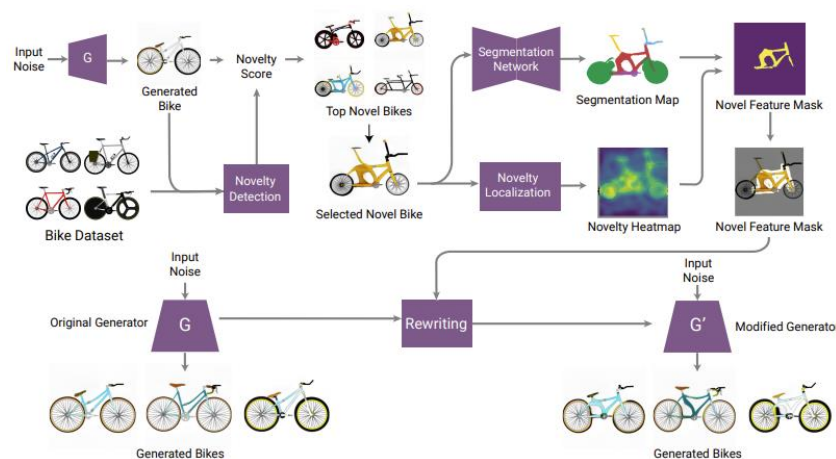
Les 2 éléments phares composant le GAN

B. 2021 – CreativeGAN

Principe

Le CreativeGAN est un algorithme créé en 2021 par des chercheurs en MIT. Son objectif est de générer de nouveaux designs, en l'occurrence pour des vélos. Pour ce faire, il croise deux concepts : celui du GAN et celui de la détection de nouveauté. Ainsi, il identifie les composants qui produisent une conception unique et modifie un modèle généré grâce au GAN afin qu'il devienne plus susceptible de générer des conceptions avec des composants uniques identifiés.

La méthode combine la détection de la nouveauté, la segmentation, la localisation de la nouveauté, la réécriture et des modèles génératifs de pointe pour la synthèse de conception créative. À l'aide d'un ensemble de données de conceptions de vélos, les auteurs démontrent que la méthode peut créer de nouvelles conceptions de vélos avec des cadres et des poignées uniques, et généraliser les nouveautés rares à un large éventail de conceptions. La méthode automatisée ne nécessite aucune intervention humaine et démontre un moyen de repenser la synthèse et l'exploration du design créatif.



Processus général de CreativGAN

Analyse de l'article

Variables	Critères	Réponses
La référence bibliographique	L'éditeur	Nom
		DeCoDe – Design Computation & Digital engineering Lab (MIT)
		Nationalité
		Americaïn
		Audience (public visé) / thématiques
		Chercheurs et scientifiques en computer science
		Site web / URL
		http://decode.mit.edu/projects/creativegan/
		Titres édités
L'article	L'article	Titre
		"CreativGan : Editing Generative Adversarial Networks for Creative Design Synthesis"
		Auteurs
		Amin Heyrani Nobari , Muhammad Fathy Rashad , Faez Ahmed
		Numéro, volume et pages
Le ou les auteurs	Sont-ils clairement identifiés ? Peut-on retrouver leurs traces ?	13 pages
		Date de publication pour l'actualité des informations
		17 aout 2021
Le ou les auteurs	Sont-ils clairement identifiés ? Peut-on retrouver leurs traces ?	URL citable
		https://arxiv.org/pdf/2103.06242.pdf
		Amin Heyrani Nobari Muhammad Fathy Rashad Faez Ahmed

	Fonctions et qualités ?	Dept. of Mechanical Eng. Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts
		Dept. of Electrical and Electronic Eng. Universiti Teknologi PETRONAS Seri Iskandar, Perak, Malaysia
		Dept. of Mechanical Eng. Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts
	Notoriété des auteurs dans le champ de recherche. Utiliser Scopus	Amin Heyrani Nobari : H-index=5; citation par doc = 18 Muhammad Fathy Rashad : not found Faez Ahmed : h-index=11 ; citations= 426
	Coordonnées des auteurs ? Est-il possible de contacter l'auteur pour faire des commentaires/critiques sur son article ?	ahnobari@mit.edu muhammad.fathy.25547@utp.edu.my faez@mit.edu
Le contenu de l'article	Thèmes de l'article	Computer science, generation d'iamge (GAN)
	Le titre ? Est-il informatif, présente-t-il le contenu de l'article ?	Oui, "CreativGan : Editing Generative Adversarial Networks for Creative Design Synthesis" On comprends que l'article va parler du développement d'un nouvel algorithme appelé CreativGan, ce qui est bien le cas
	Mots clés auteur	
	Le résumé ? Explicite-t-il clairement le contenu de l'étude ?	Il parle des problèmes actuels (impossibilité d'avoir un GAN créatif) Il parle de la solution trouvée CreativGAN : « (...) il identifie les composants qui rendent une conception unique et modifie un modèle GAN de sorte qu'il devient plus susceptible de générer des conceptions avec des composants uniques identifiés. La méthode combine la détection de nouveauté, la segmentation, la localisation de nouveauté, la réécriture et des modèles génératifs de pointe pour la synthèse de conception créative. À l'aide d'un ensemble de données de conceptions de vélos, nous démontrons que la méthode peut créer de nouvelles conceptions de vélos avec des cadres et des poignées uniques, et généraliser les nouveautés rares »
	L'introduction La problématique et les hypothèses sont-elles facilement identifiables ?	Oui le plan est clair. La problématique se trouve dans l'abstract
	Le corps de texte ? L'information est-elle clairement organisée, présence d'un plan de parties logiques ?	<div> <div>Matériels et méthodes : données utilisées, variables, protocole de recherche, analyse statistique ...</div> <div>Résultats + données précises, figures, schéma...</div> <div>Discussion et conclusion</div> </div>
Les références	Présence d'une bibliographie ?	Le nombre de références citées reste raisonnable, chaque référence apporte un éclaircissement sur un sujet
		Oui

(citations) utilisées		Le contenu de l'article démontre que les références ont été lues (présence de notes de bas de page, citation dans le corps du texte...)	Oui
		Les références sont présentées selon des règles strictes	Oui exemple : « [1] Jagtap, S., 2019. "Design creativity: refined method for novelty assessment". International Journal of Design Creativity and Innovation, 7(1-2), pp. 99–115 » [n°] Nom, date, nom article, journal, n° page
		Vérifier la réputation des références citées. Utiliser Scopus	« Design creativity: refined method for novelty assessment". International Journal of Design Creativity and Innovation » : cité 45x «Assessing design creativity. Design Studies » : cité 458x
La notoriété de l'article	La localisation de l'article	L'article est-il présent sur plusieurs bases de données ? Sur des sites de laboratoire, des pages personnelles de chercheurs ?	ASME : American society of mechanical engineers. C'est une société savante basée aux États-Unis active dans le domaine de la recherche scientifique en mécanique ArXiv: c'est une archive ouverte de prépublications électroniques d'articles scientifiques dans les domaines de la physique, des mathématiques, de l'informatique, de la biologie quantitative, de la finance quantitative, de la statistique, de l'ingénierie électrique et des systèmes, et de l'économie ¹ , et qui est accessible gratuitement par Internet
		Quelle est la réputation des ressources ?	ArXiv est un outil très apprécié connu principalement par sa présence numérique. Cependant les visuels et la voix incohérents d'arXiv ont projeté un air de négligence. Puisque tous les documents sont déposés sur arXiv, il ne garantit pas la justesse et la qualité de article déposé
		Adéquation par rapport aux thématiques recherchées ?	ASME : c'est bien en lien car l'article se concentre sur les vélos, plus exactement au design des vélo. On peut y voir un lien avec la mécanique ArXiv traite quasiment tous les domaines, donc c'est cohérent
	Citations Utiliser Scopus ou Google Scholar	L'article est-il cité par d'autres articles ?	oui
		Combien de fois ?	13 fois

Contribution de l'article

Introduire une approche pour modifier systématiquement les modèles GAN

- Afin de synthétiser de nouvelles conceptions de manière automatisée sans nécessiter d'interaction ou d'implication humaine

Démontre que leur méthode augmente la nouveauté des conceptions générées par les GAN

- Montrant ainsi le potentiel d'automatisation de la créativité dans la synthèse de conception basée sur les données (à l'aide d'une application de synthèse de bicyclettes)

Détecter les conceptions uniques

- Démontrer que l'algorithme de détection d'anomalies, lorsqu'il est appliqué à différentes granularités, peut identifier des conceptions uniques et des composants uniques dans chaque conception.

Efficacité d'un modèle de segmentation sémantique basé sur un CNN

- Pour prédire l'emplacement des parties d'un vélo pour toute nouvelle conception, avec un score global d'intersection sur l'union (IoU) de 83,8 %.

2 métriques pour la mesure de nouveauté

- Fournissent deux métriques pour mesurer la nouveauté dans les échantillons générés par GAN, l'une utilisant la similarité structurelle de l'image et l'autre combinant les caractéristiques d'un réseau de neurones pré-formé avec l'approche du plus proche voisin

II. Implémentation & Comparaison

A. Dataset et stratégie

L'article que nous avons regardé propose donc l'algorithme CreativeGAN présenté ci-dessus. Nous avons cherché à **comparer** la méthode de ces auteurs avec la méthode GAN originale, afin de vérifier que les designs créés par l'algorithme CreativeGAN sont bien originaux. Pour ce faire, nous avons implémenté l'algorithme de GAN « classique », afin de générer des images « non originales » et les comparer aux images générées de l'étude, qui sont censées être originales.

Le dataset mis à disposition de l'étude est une banque de 4800 images de vélos, tous différents (par leurs roues, guidon, cadre, etc.). L'étude met également à disposition un dataset en noir et blanc. Etant donné que nos ordinateurs n'étaient pas assez puissants pour faire tourner l'algorithme sur le dataset coloré, c'est celui en noir et blanc que nous avons choisi.

Voici un extrait de la banque d'images ci-dessous :



Extraits du dataset de vélos

Par la suite nous allons voir comment nous avons implémenter les 2 algorithmes suivi d'une comparaison entre les résultats.

B. GAN

Vous retrouverez sur le lien ci-dessous le code GAN classique de génération d'image implémenté nous-même : https://github.com/Annabel64/GAN_image-generator

Comme expliqué précédemment, l'algorithme GAN se décompose en deux parties phares: le générateur et le discriminateur.

Afin de les construire, il a fallu s'inspirer du pseudo-code de l'algorithme GAN mais également des codes existants. En effet, le GAN est une méthode et peut être utilisé dans différentes applications: colorisation d'images, suppressions d'objets sur une image, etc. Ici, nous nous intéressons à de la **génération d'images**. Les couches et nombre de neurones utilisés sont donc différents en fonction du cas d'usage. Voici les caractéristiques de nos réseaux de neurones utilisés :

```
Generator et discriminator

# Input dimensionality for generator
codings_size = 30

generator = keras.Sequential(
    [
        keras.layers.Dense(100, activation="selu", input_shape=(codings_size,)),
        keras.layers.Dense(150, activation="selu"),
        keras.layers.Dense(710 * 1536, activation="sigmoid"),
        keras.layers.Reshape((710, 1536)),
    ],
    name="generator"
)
discriminator = keras.Sequential(
    [
        keras.layers.Flatten(input_shape=(710, 1536)),
        keras.layers.Dense(150, activation="selu"),
        keras.layers.Dense(100, activation="selu"),
        keras.layers.Dense(1, activation="sigmoid"),
    ],
    name="discriminator"
)
```

Code – définition du générateur et discriminateur

Pour rappel :

- La fonction d'activation Selu (Scaled Exponential Linear Unit) est défini comme suit :
 - o si $x > 0$, renvoie $s * x$;
 - o si $x < 0$, renvoie $s * \alpha * (\exp(x) - 1)$

où α et s sont des constantes prédéfinies ($\alpha=1,67326324$ et $s=1,05070098$).

- La fonction d'activation Sigmoid prend n'importe quelle valeur réelle en entrée et produit des valeurs comprises entre 0 et 1

- Les couches « flatten » sont utilisées pour rendre l'entrée multidimensionnelle unidimensionnelle
- Les valeurs 710*1536 sont les dimensions de nos images (largeur*hauteur) en nombre de pixels

```
gan = keras.Sequential([generator, discriminator])

# Print GAN model summary
gan.summary()
```

Model: "sequential"

Layer (type)	Output Shape	Param #
generator (Sequential)	(None, 710, 1536)	164692810
discriminator (Sequential)	(None, 1)	163599351

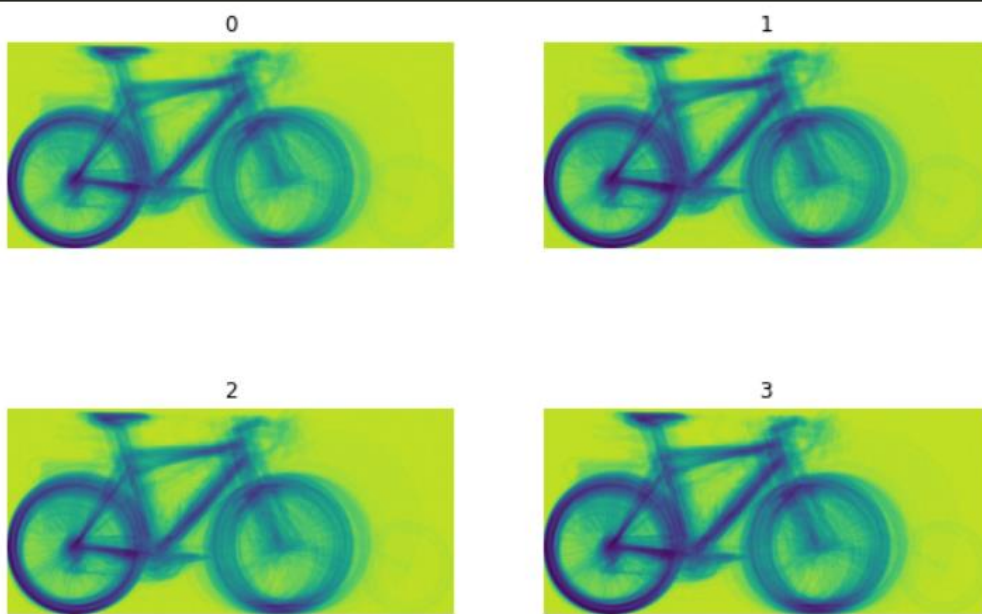
=====
Total params: 328,292,161
Trainable params: 328,292,161
Non-trainable params: 0

Code - GAN

Le modèle GAN est donc défini à partir de ceux deux réseaux de neurones qui se complètent, afin de générer des images ressemblantes aux images entrées lors de l'entraînement.

Deux principales limites nous bloquaient : la puissance de nos GPU, et le temps. Nous étions alors limités à 1000 époques pour un ordinateur type PC. Les résultats sont affichés ci-dessous (pour respectivement 100 et 1000 epoch).

```
noise = tf.random.normal(shape=(batch_size, codings_size))  
generated_images = generator(noise)  
plot_multiple_images(generated_images, 4)
```



Images générées après 100 époques

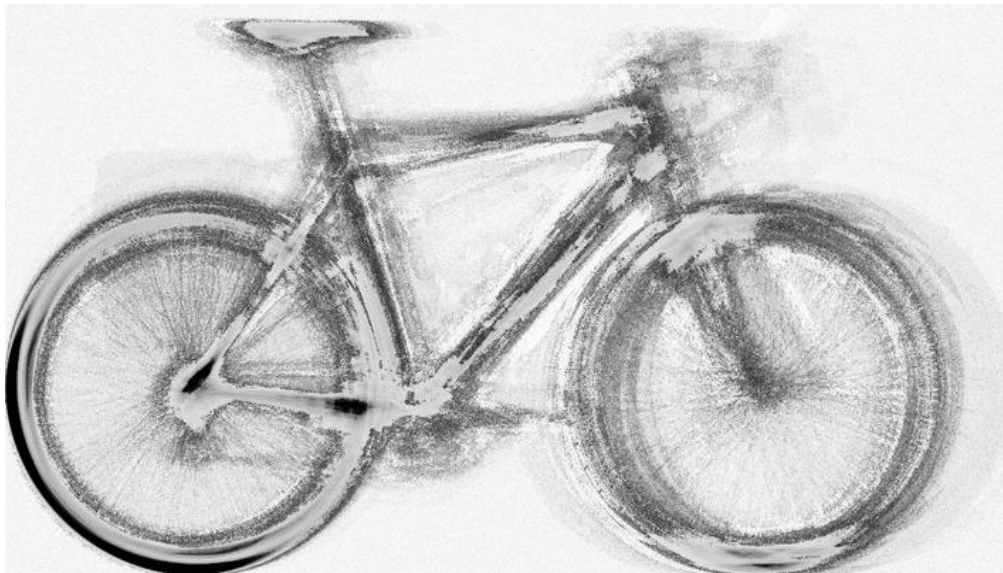
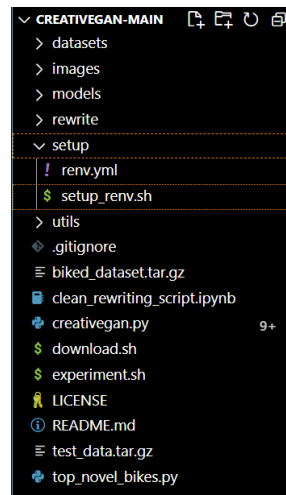


Image générée après 1000 époques

C. CreativeGAN

Nous nous sommes basés sur le lien github fournie par l'article. Tous le pré-processing était réalisé grâce à des fichier.sh exécutable sur linux. Nous avons pu les réaliser manuellement sur window. Nous avons pu importer les modèles pré-entraînés, télécharger les données et créer l'environnement python nécessaire.



Nous avons rencontré des problèmes de compatibilités. L'algorithme du creativeGAN nécessite l'utilisation de cudatoolkit qui utilise notre carte graphique pour réaliser des opérations. La version de cudatoolkit utilisée dans l'algorithme n'était plus compatible avec nos cartes graphiques rendant le code inutilisable.

```
python creativegan.py --name "bike" \
--model_path "./models/stylegan2_bike.pt" \
--seg_model_path './models/segmentation_bike.pt' \
--seg_channels 3 \
--data_path './datasets/biked' \
--copy_id $handle \
--paste_id 7 \
--context_ids 7-12 \
--layernum 8 \
--ssim \
--novelty_score
```

Paramètres utilisés pour lancer le fichier python

Critique du code :

Ne pouvant tester le code nous avons tenté de le comprendre. La tâche était rendue difficile pour plusieurs raisons :

1. Le code était commenté en superficiele : seulement quelques lignes de commentaires dans le main. Aucune des fonctions n'étaient commentées. Les noms de variables étaient peu autoporteurs.
2. Le non-respect de ces deux préceptes à savoir, choisir des noms autoporteurs et commenter chacune de ses fonctions rendaient la lecture et la compréhension pour un lecteur extérieur assez difficile.

Conclusion

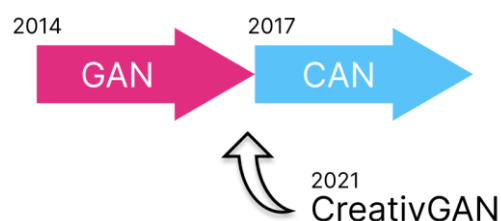
CreativGan un algorithme vraiment créatif / œuvre originale?

En comparant les résultats de notre algorithme GAN et de l'algorithme de CreativGAN de l'article, on constate que les designs des vélos de l'algorithme ont des particularités que l'on ne retrouve pas dans les vélos du GAN. En effet, les vélos de l'algorithme classique se rapprochent beaucoup du vélo « de base », les traits et caractéristiques que l'on retrouve sur la majorité des vélos, et ne recherche pas à mettre en avant les sacoches, les cadres originaux, des guidons des vélos sportifs, etc.

L'algorithme CreativGAN encourage ses IA à mettre en avant les touches d'originalité dans le design de ses vélos, et cela se ressent bien dans les images qui ont été générées.

Où s'insère-t-il dans l'état de l'art ?

On aurait pu s'attendre à l'amélioration des algorithmes CAN pour la création d'images originales. Or le CreativGAN est un algorithme basé sur le GAN comme le suggère son nom. C'est pourquoi on le place entre le GAN et le CAN chronologiquement.



On pourrait voir le creativGAN comme une autre solution, parallèle au CAN, aux problématiques de motivation dans la génération d'image créative.

Ouverture et pistes d'amélioration

Pour améliorer les performances de l'algorithme GAN, nous pourrions diminuer la qualité de nos images d'entraînement et des images à générer. En effet, le nombre important de pixels rend l'exécution longue et coûteuse.