

Analyse des résultats

Nous allons ici analyser et expliquer les résultats des différents modèles.
Commençons par charger les données :

Initialisation

```
# imports nécessaires
import os
import pandas as pd
import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.animation import FuncAnimation

from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import (mean_squared_error,
                             root_mean_squared_error)

import tensorflow as tf
from tensorflow.keras.models import load_model

def centrage_bassin(seq):
    bass = seq[:, 0:1, :]
    return seq-bass

def compute_velocity(sequence):
    vel = np.zeros_like(sequence)
    vel[1:] = sequence[1:] - sequence[:-1]
    return vel

def load_sequence(path):
    raw = (
        pd.read_json(path)['instances']
        .str[0]
        .str.get('keypoints')
        .to_numpy()
    )

    seq = np.array([np.array(f).reshape(17, 3) for f in raw])

    return seq

POINT_PATH="./data/points"
MODEL_PATH="./data/models/"
JOINTURES=["Bassin", "HancheD", "GenouD", "ChevilleD", "HancheG", "GenouG",
           "ChevilleG", "Colonne", "Thorax", "Cou", "Tete", "EpauleG", "CoudeG", "Poigne"]
```

```

tG", "EpauleD", "CoudeD", "PoignetD"]
NB_JOINTURES = len(JOINTURES)
SQUELETTE = [
    (0,1),(1,2),(2,3),      # jambe droite
    (0,4),(4,5),(5,6),      # jambe gauche
    (0,7),(7,8),(8,9),(9,10), # colonne
    (8,11),(11,12),(12,13),  # bras gauche
    (8,14),(14,15),(15,16)   # bras droit
]
type PointSequence = np.array

#chargement des points
points = os.listdir(POINT_PATH)
points = [f for f in points if os.path.isfile(os.path.join(POINT_PATH, f))]
datas = [centrage_bassin(load_sequence(os.path.join(POINT_PATH, ele)))
for ele in points]

#chargement des stats
MEAN_POS = np.load("data/compute/mean_pos.npy")
STD_POS = np.load("data/compute/std_pos.npy")
MEAN_VEL = np.load("data/compute/mean_vel.npy")
STD_VEL = np.load("data/compute/std_vel.npy")

MEAN_POS_3D = np.load("data/compute/mean_pos_3d.npy")
STD_POS_3D = np.load("data/compute/std_pos_3d.npy")

MEAN_VEL_3D = np.load("data/compute/mean_vel_3d.npy")
STD_VEL_3D = np.load("data/compute/std_vel_3d.npy")

BONE_LENGTHS = np.load("data/compute/bone_lengths.npy",
allow_pickle=True).item()

def plot_animation(sequence, title=""):
    T = sequence.shape[0]

    fig = plt.figure()
    ax = fig.add_subplot(111, projection="3d")
    ax.set_title(title)

    # limites fixes
    mins = sequence.min(axis=(0,1))
    maxs = sequence.max(axis=(0,1))

    ax.set_xlim(mins[0], maxs[0])
    ax.set_ylim(mins[1], maxs[1])
    ax.set_zlim(mins[2], maxs[2])

    ax.set_xlabel("X")
    ax.set_ylabel("Y")

```

```

ax.set_zlabel("Z")

pts0 = sequence[0]

points = ax.scatter(
    pts0[:,0], pts0[:,1], pts0[:,2],
    c="red", s=40
)

lines = []
for i, j in SQUELETTE:
    line, = ax.plot(
        [pts0[i,0], pts0[j,0]],
        [pts0[i,1], pts0[j,1]],
        [pts0[i,2], pts0[j,2]],
        c="black"
    )
    lines.append(line)

def update(frame):
    pts = sequence[frame]

    points._offsets3d = (pts[:,0], pts[:,1], pts[:,2])

    for line, (i, j) in zip(lines, SQUELETTE):
        line.set_data([pts[i,0], pts[j,0]],
                      [pts[i,1], pts[j,1]])
        line.set_3d_properties([pts[i,2], pts[j,2]])

    return [points] + lines

return FuncAnimation(
    fig,
    update,
    frames=T,
    interval=33,
    blit=False
)

```

Nous allons définir plusieurs fonctions nous permettant de mesurer l'erreur, toutes spécialisées dans un aspect du modèle.

Premièrement, une erreur qui mesure chaque jointure du squelette indépendamment :

```

def joint_mse(y_true, y_pred) :
    err = (y_true - y_pred) ** 2
    err = err.reshape(err.shape[0], 17, 3)
    return err.mean(axis=(0,2))

```

Et ensuite, une erreur mesurant l'écart de la longueur des os

```
def bone_lenght_error(y_true: PointSequence, y_pred: PointSequence):
    T = y_true.shape[0]
    nb_bones = len(SQUELETTE)

    err_bone = np.zeros((T,nb_bones))

    for b, (i,j) in enumerate(SQUELETTE):
        L_true = np.linalg.norm(y_true[:, i] - y_true[:, j], axis=-1)
        L_pred = np.linalg.norm(y_pred[:, i] - y_pred[:, j], axis=-1)

        err_bone[:,b] = np.abs(L_pred - L_true)

    return err_bone
```

Choisissons nos données de test, pour cela nous utiliserons comme dans le notebook de prédiction, la fonction `train_test_split`:

```
_ , test = train_test_split(datas)
del _
print("Taille de test : ", len(test))

Taille de test : 111
```

Modèle n°1

Premièrement, importons le modèle :

```
#chargement du premier modèle
lstm_simple = load_model(MODEL_PATH + "lstm_simple.keras")
lstm_simple.summary()
```

WARNING: All log messages before absl::InitializeLog() is called are written to STDERR

I0000 00:00:1768925929.041641 1474924 gpu_device.cc:2020] Created device /job:localhost/replica:0/task:0/device:GPU:0 with 9495 MB memory: -> device: 0, name: NVIDIA GeForce RTX 4070, pci bus id: 0000:01:00.0, compute capability: 8.9

I0000 00:00:1768925929.043049 1474924 gpu_device.cc:2020] Created device /job:localhost/replica:0/task:0/device:GPU:1 with 2604 MB memory: -> device: 1, name: NVIDIA GeForce GTX 1650, pci bus id: 0000:04:00.0, compute capability: 7.5

Model: "sequential"

Layer (type)	Output Shape	
Param #		

lstm (LSTM)	(None, 30, 128)	
92,160		
lstm_1 (LSTM)	(None, 128)	
131,584		
dense (Dense)	(None, 51)	
6,579		

Total params: 690,971 (2.64 MB)

Trainable params: 230,323 (899.70 KB)

Non-trainable params: 0 (0.00 B)

Optimizer params: 460,648 (1.76 MB)

WINDOW_SIZE = 30

```
def make_data_for_lstm_simple(data: list[PointSequence],
window=WINDOW_SIZE):
    # passage sous forme de "fenêtre"
    def create_sequence(seq: PointSequence):
        x, y = [], []
        for i in range(len(seq) - window):
            x.append(seq[i : i + window])
            y.append(seq[i + window])
        return np.array(x), np.array(y)

    X_all, Y_all = [], []

    for seq in data:
        X, Y = create_sequence(seq)
        X_all.append(X)
        Y_all.append(Y)

    X_all = np.concatenate(X_all)
    Y_all = np.concatenate(Y_all)

    X_all = X_all.reshape(X_all.shape[0], X_all.shape[1], -1)
    Y_all = Y_all.reshape(Y_all.shape[0], -1)
    # normalization

    X_all = (X_all - MEAN_POS) / STD_POS
    Y_all = (Y_all - MEAN_POS) / STD_POS
```

```

    return X_all, Y_all

def inverse_lstm_output(pred_seq):
    pred_seq = np.array(pred_seq)

    # 2D
    if pred_seq.ndim == 3 and pred_seq.shape[1:] == (17,3):
        T = pred_seq.shape[0]
        pred_seq = pred_seq.reshape(T, 51)

    # reshape mean et std
    mean_flat = MEAN_POS.reshape(1, 51)
    std_flat = STD_POS.reshape(1, 51)

    # dénormalisation
    pred_seq = pred_seq * std_flat + mean_flat

    # -> (T,17,3)
    pred_seq = pred_seq.reshape(pred_seq.shape[0], 17, 3)

    return pred_seq

def auto_pred(model, input, nbframe):
    window = input.copy()
    pred = []

    for _ in range(nbframe):
        y = model.predict(window[None], verbose=0)

        pred.append(y)

        window = np.vstack([window[1:], y])

    return np.array(pred)

```

Mesurons à quel point notre modèle mesure correctement la frame suivante :

En prédiction simple (sans auto-régression)

```

# la moyenne de tous les échantillons :
NB_FRAME = 120

mean_rmse_per_joint = np.zeros((NB_FRAME, 17))
mean_bone_lenght_err = np.zeros((NB_FRAME, len(SQUELETTE)))

for seq in test:
    Y_v = seq[:NB_FRAME+WINDOW_SIZE]
    X,_ = make_data_for_lstm_simple([Y_v])
    Y_pred = inverse_lstm_output(lstm_simple.predict(X, verbose=0))

```

```

T = min(len(Y_pred), NB_FRAME)

joint_err = np.linalg.norm(Y_v[:T] - Y_pred[:T], axis=-1)
bone_err = bone_lenght_error(Y_v[:T], Y_pred[:T])

mean_rmse_per_joint[:T] += joint_err
mean_bone_lenght_err[:T] += bone_err

mean_rmse_per_joint /= len(test)
mean_bone_lenght_err /= len(test)

2026-01-20 17:18:50.005773: I
external/local_xla/xla/stream_executor/cuda/cuda_dnn.cc:473] Loaded
cuDNN version 91800

```

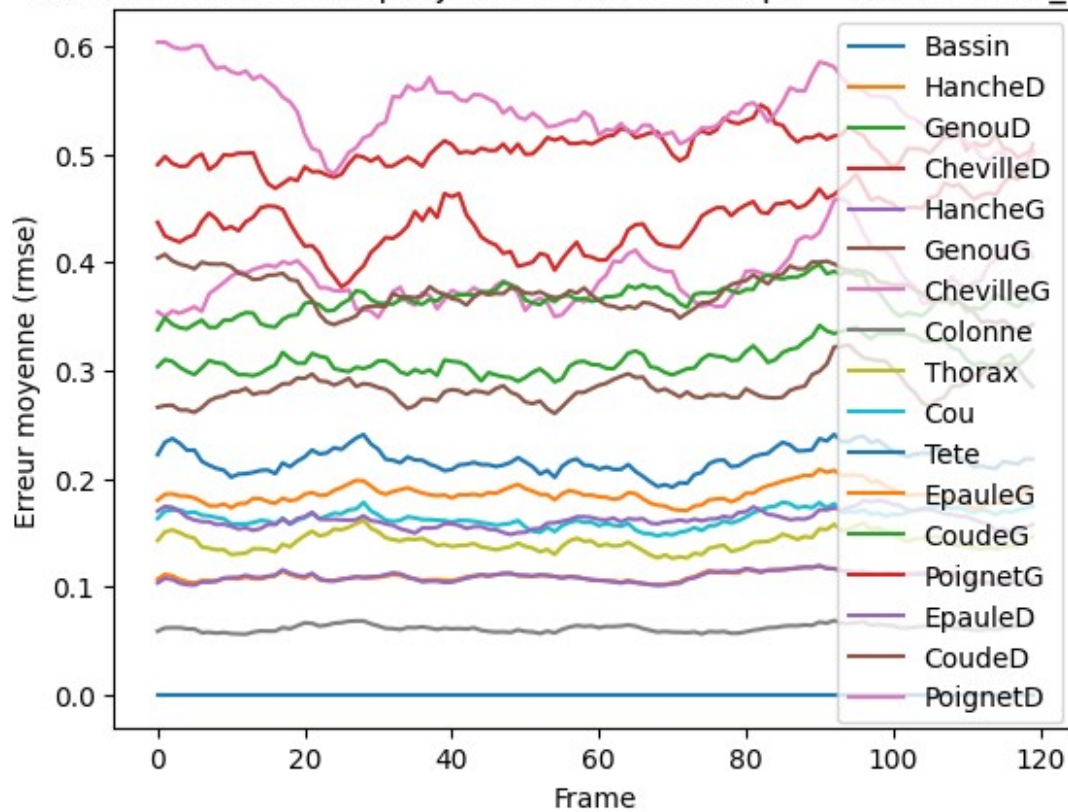
Sur les jointures

```

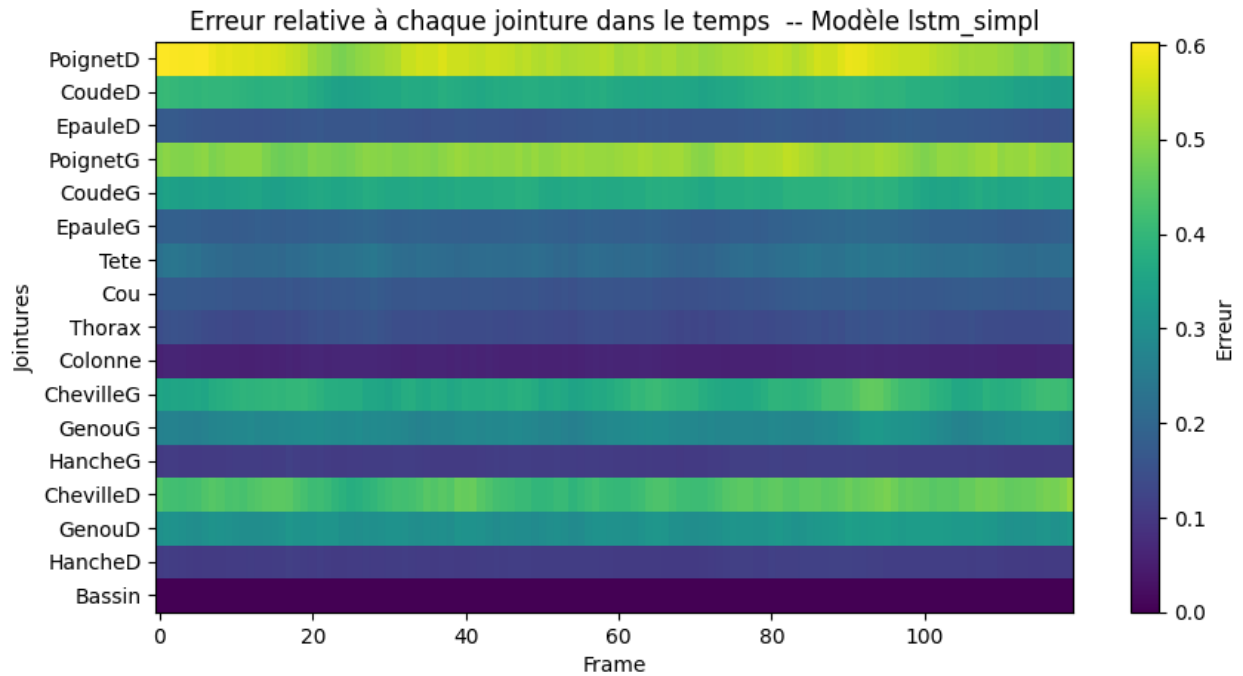
for i in range(NB_JOINTURES):
    plt.plot(mean_rmse_per_joint[:,i], label=JOINTURES[i])
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Erreur moyenne (rmse)")
plt.title("Erreur relative à chaque jointure dans le temps -- Modèle
lstm_simpl")
plt.legend()
plt.show()

```

Erreur relative à chaque jointure dans le temps -- Modèle lstm_simpl

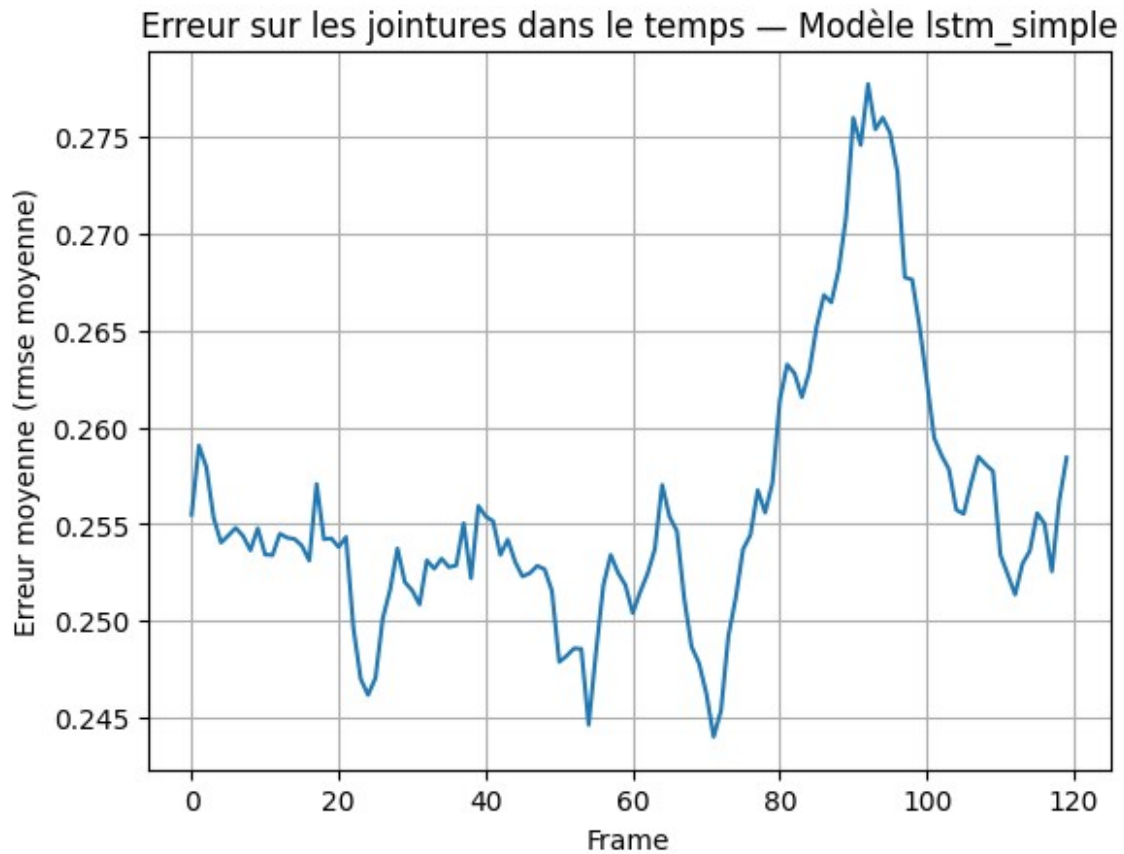


```
plt.figure(figsize=(10,5))
plt.imshow(mean_rmse_per_joint.T, aspect="auto", origin="lower")
plt.colorbar(label="Erreur")
plt.yticks(range(17), JOINTURES)
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Jointures")
plt.title("Erreur relative à chaque jointure dans le temps -- Modèle lstm_simpl")
plt.show()
```

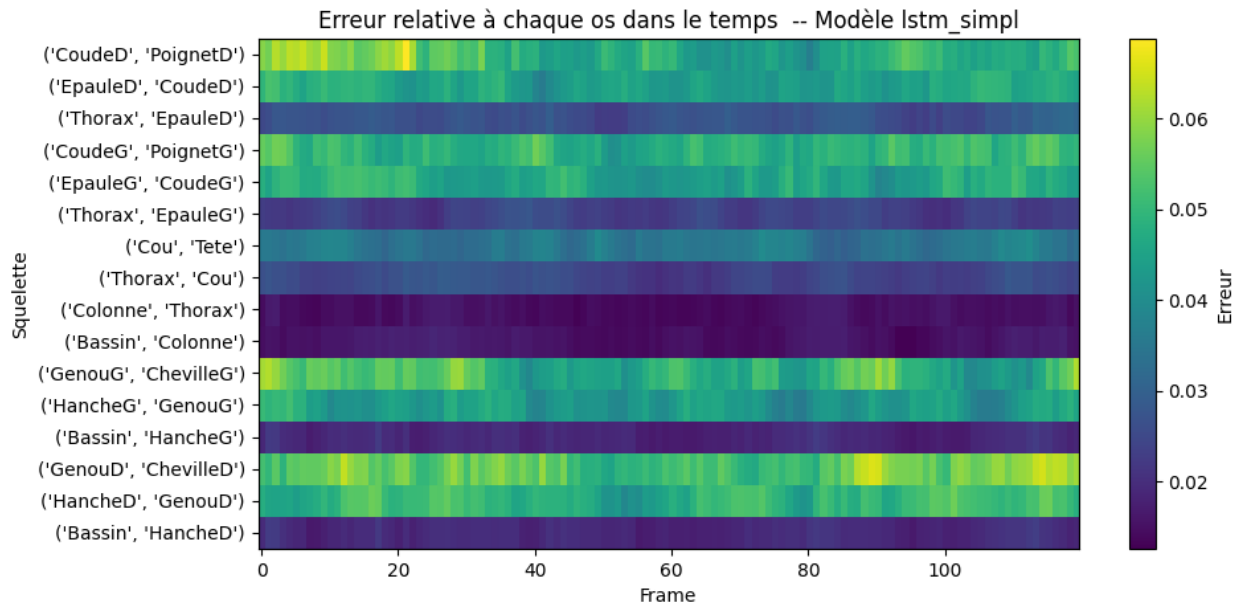
Et en moyenne sur les jointures :

```
mean_joint_err = mean_rmse_per_joint.mean(axis=1)
plt.figure()
plt.plot(mean_joint_err)
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Erreur moyenne (rmse moyenne)")
plt.title("Erreur sur les jointures dans le temps – Modèle
lstm_simple")
plt.grid()
plt.show()
```



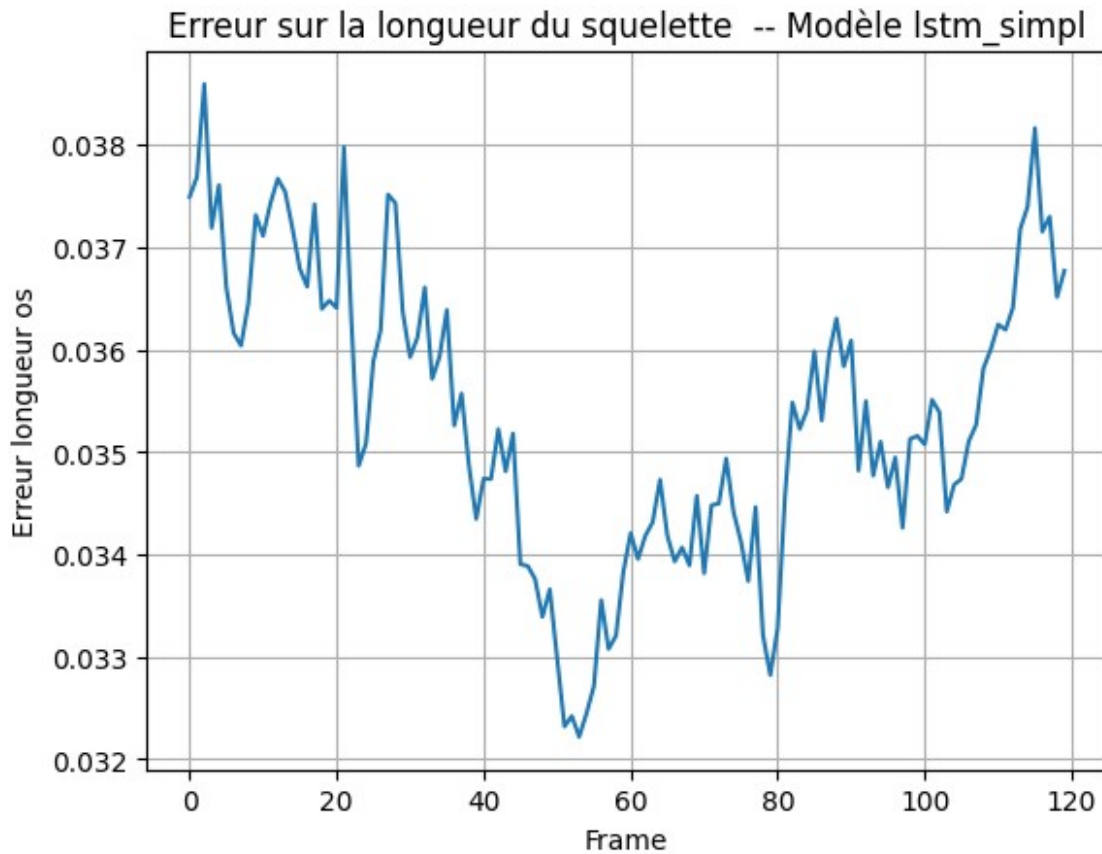
Et sur les os :

```
plt.figure(figsize=(10,5))
plt.imshow(mean_bone_lenght_err.T, aspect="auto", origin="lower")
plt.colorbar(label="Erreur")
labels = [str((JOINTURES[i], JOINTURES[j])) for i,j in SQUELETTE]
plt.yticks(range(len(SQUELETTE)), labels)
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Squelette")
plt.title("Erreur relative à chaque os dans le temps -- Modèle
lstm_simpl")
plt.show()
```



```
bone_time = mean_bone_lenght_err.mean(axis=1)

plt.plot(bone_time)
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Erreur longueur os")
plt.title("Erreur moyenne sur la longueur des os -- Modèle
lstm_simpl")
plt.grid(True)
plt.show()
```



Globalement, pour chacune des deux erreurs, nous avons un résultat proche d'un simple bruit, avec des valeurs oscillant entre 0.2 et 0.3 pour les jointures, et entre 0.033 et 0.038 pour les os.

En Auto-régression

```
# la moyenne de tous les échantillons :
NB_FRAME = 80
NB_SEQ = 20

mean_rmse = np.zeros(())
mean_rmse_per_joint = np.zeros((NB_FRAME, 17))
mean_bone_lenght_err = np.zeros((NB_FRAME, len(SQUELETTE)))

for seq in test[:NB_SEQ] :
    X = seq
    Y_true = X[WINDOW_SIZE:WINDOW_SIZE+NB_FRAME]

    input = X[:WINDOW_SIZE].reshape(WINDOW_SIZE, -1)
    input = (input - MEAN_POS) / STD_POS

    Y_pred = auto_pred(lstm_simple, input, NB_FRAME)
    Y_pred = inverse_lstm_output(Y_pred)

    T = min(len(Y_pred), NB_FRAME)
```

```

joint_err = np.linalg.norm(Y_true[:T] - Y_pred[:T], axis=-1)
bone_err = bone_lenght_error(Y_true[:T], Y_pred[:T])

mean_rmse_per_joint[:T] += joint_err
mean_bone_lenght_err[:T] += bone_err

mean_rmse_per_joint /= len(test[:NB_SEQ])
mean_bone_lenght_err /= len(test[:NB_SEQ])

```

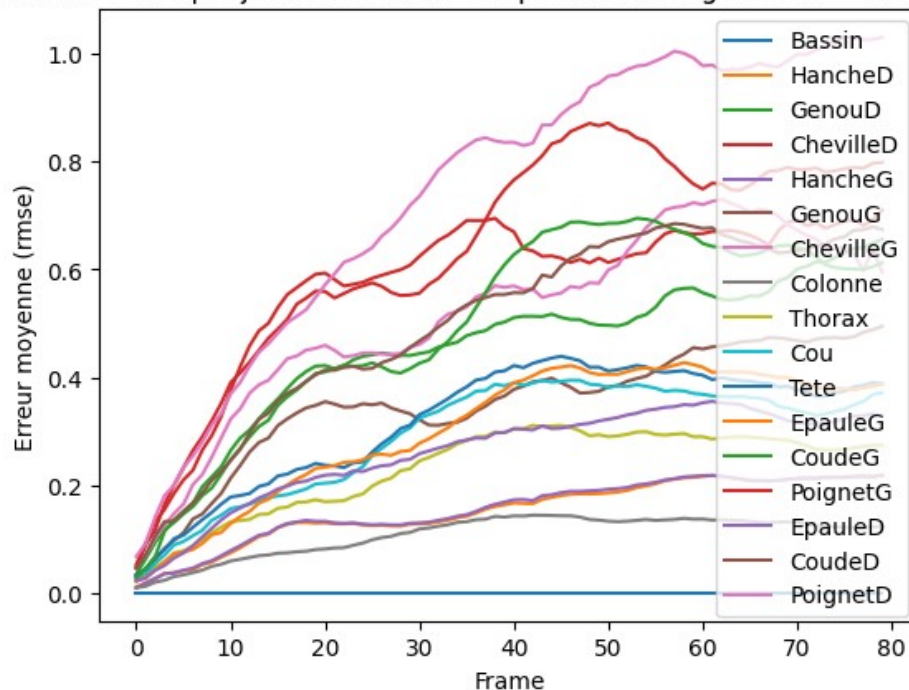
Sur les jointures

```

for i in range(NB_JOINTURES):
    plt.plot(mean_rmse_per_joint[:,i], label=JOINTURES[i])
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Erreur moyenne (rmse)")
plt.title("Erreur relative à chaque jointure dans le temps en auto-  
régression -- Modèle lstm_simpl")
plt.legend()
plt.show()

```

Erreur relative à chaque jointure dans le temps en auto-régression -- Modèle lstm_simpl

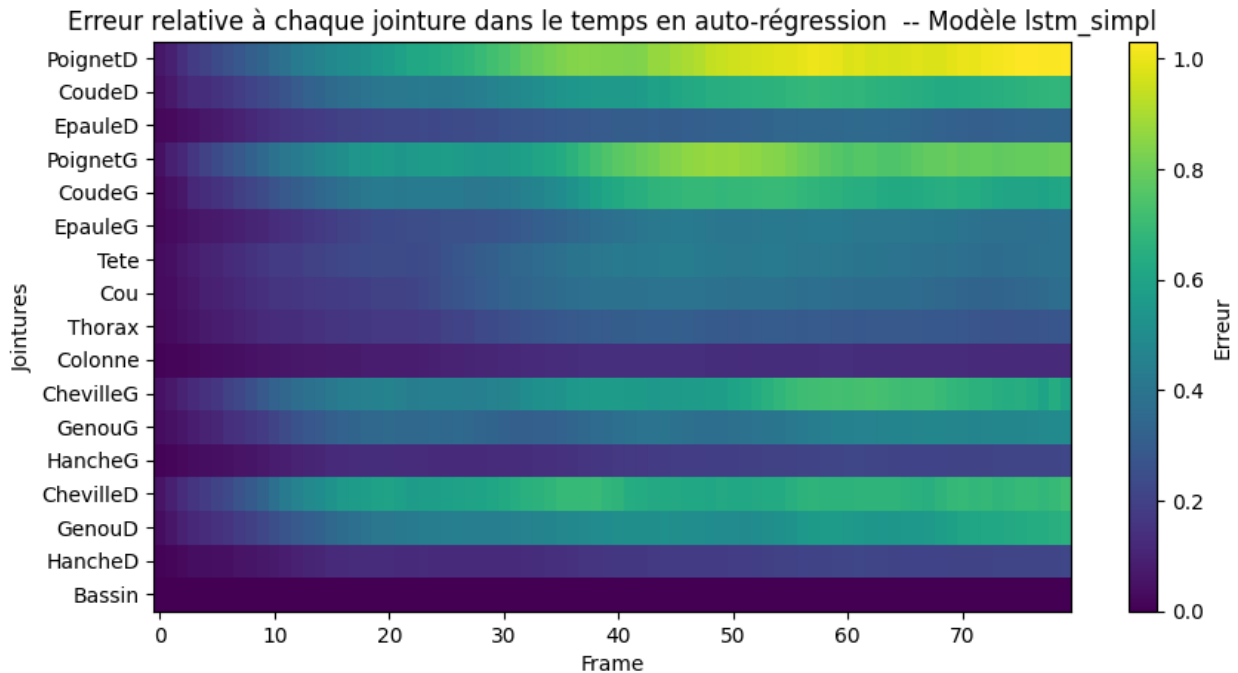


```

plt.figure(figsize=(10,5))
plt.imshow(mean_rmse_per_joint.T, aspect="auto", origin="lower")
plt.colorbar(label="Erreur")
plt.yticks(range(17), JOINTURES)
plt.xlabel("Frame")

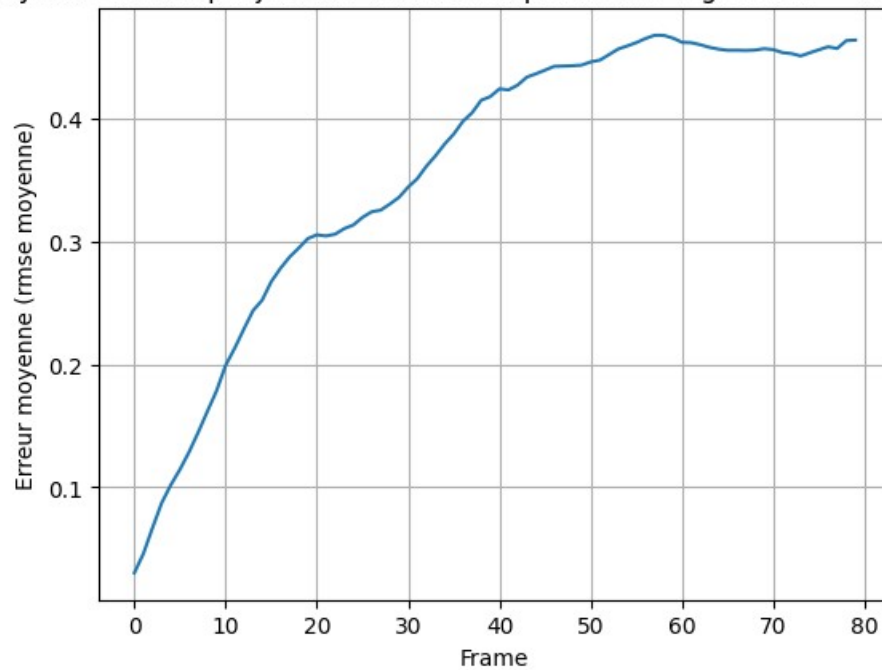
```

```
plt.ylabel("Jointures")
plt.title("Erreur relative à chaque jointure dans le temps en auto-
régression -- Modèle lstm_simpl")
plt.show()
```



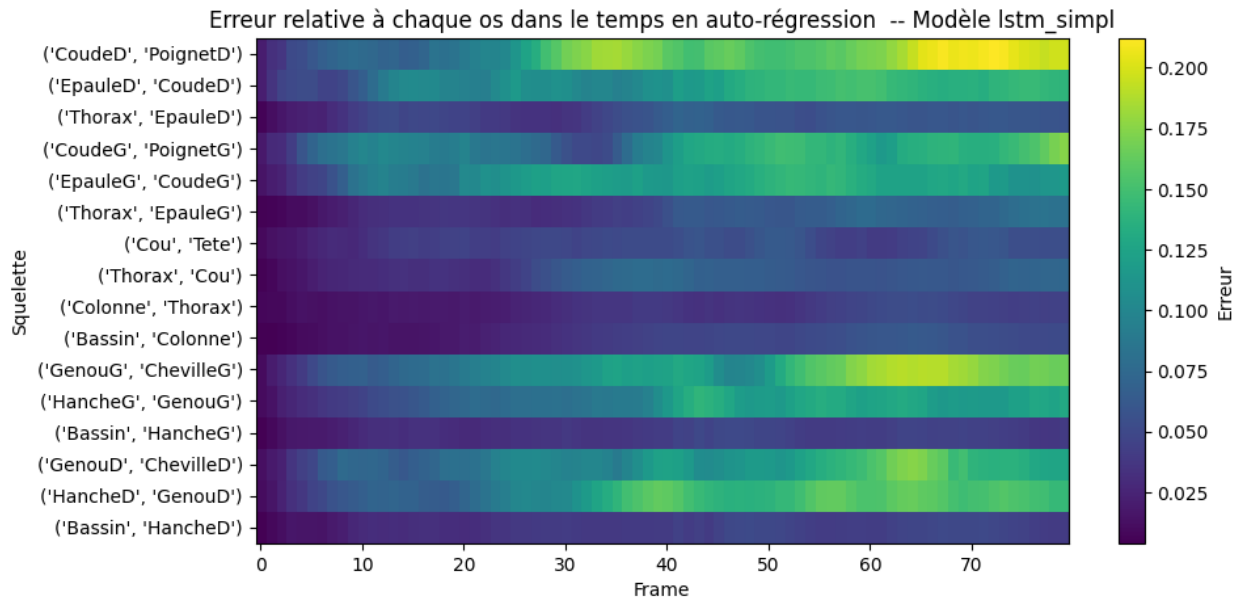
```
mean_joint_err = mean_rmse_per_joint.mean(axis=1)
plt.figure()
plt.plot(mean_joint_err)
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Erreur moyenne (rmse moyenne)")
plt.title("Erreur moyenne de chaque jointure dans le temps en auto-
régression -- Modèle lstm_simpl")
plt.grid()
plt.show()
```

Erreur moyenne de chaque jointure dans le temps en auto-régression -- Modèle lstm_simpl



Et sur les os :

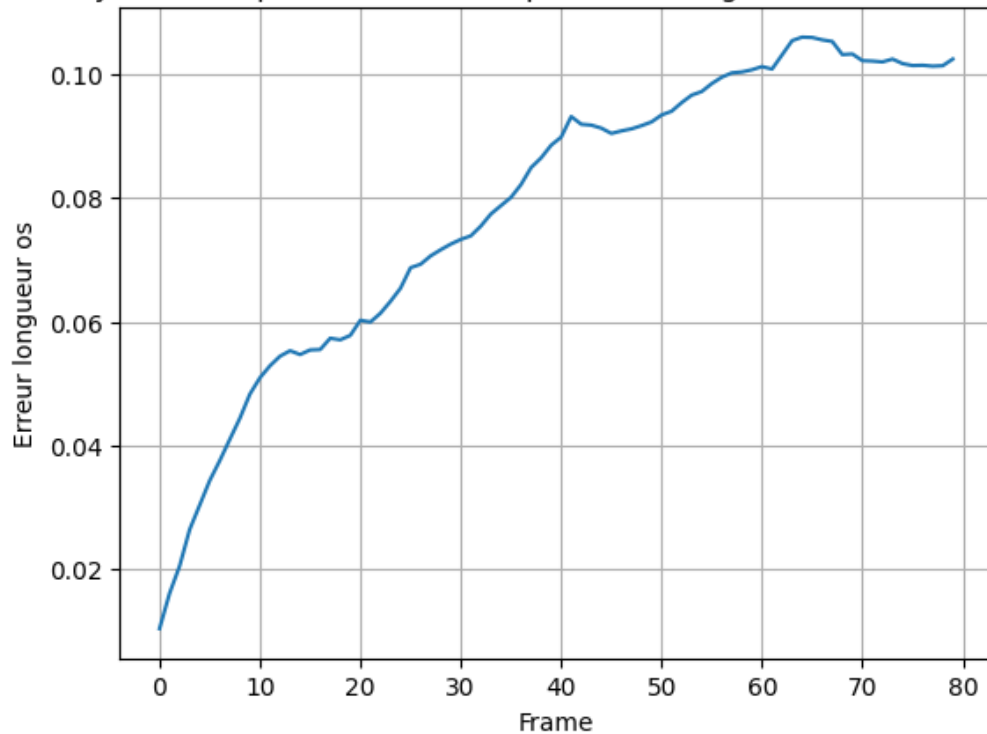
```
plt.figure(figsize=(10,5))
plt.imshow(mean_bone_lenght_err.T, aspect="auto", origin="lower")
plt.colorbar(label="Erreur")
labels = [str((JOINTURES[i], JOINTURES[j])) for i,j in SQUELETTE]
plt.yticks(range(len(SQUELETTE)), labels)
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Squelette")
plt.title("Erreur relative à chaque os dans le temps en auto-
régression -- Modèle lstm_simpl")
plt.show()
```



```
bone_time = mean_bone_lenght_err.mean(axis=1)

plt.plot(bone_time)
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Erreur longueur os")
plt.title("Erreur sur la longueur des os en auto-régression -- Modèle lstm_simpl")
plt.grid(True)
plt.show()
```


Erreur moyenne chaque os dans le temps en auto-régression -- Modèle lstm_simpl



```
del lstm_simple
```

On peut constater qu'en auto régression le modèle s'en sort beaucoup moins bien, l'erreur semble grandir de manière logarithmique, avec une forte croissance sur les première frames obtenues.

Modèle n°2

Passons maintenant au deuxième modèle :

```
conv_lstm = load_model(MODEL_PATH+"conv_lstm.keras")
conv_lstm.summary()
```

Model: "sequential_1"

Layer (type) Param #	Output Shape	
conv1d (Conv1D)	(None, 30, 128)	
32,768		

512	batch_normalization (BatchNormalization)	(None, 30, 128)	
49,280	conv1d_1 (Conv1D)	(None, 30, 128)	
512	batch_normalization_1 (BatchNormalization)	(None, 30, 128)	
131,584	lstm_2 (LSTM)	(None, 128)	
0	dropout (Dropout)	(None, 128)	
65,790	dense_1 (Dense)	(None, 510)	
0	reshape (Reshape)	(None, 10, 51)	

Total params: 840,316 (3.21 MB)

Trainable params: 279,934 (1.07 MB)

Non-trainable params: 512 (2.00 KB)

Optimizer params: 559,870 (2.14 MB)

HORIZON = 10

WINDOW_SIZE = 30

NB_FEATURES = len(JOINTURES)*3

test_vel = [compute_velocity(seq) for seq in test]

```
def compute_position(
    vel_seq: PointSequence, star_pos: np.ndarray, bassin_en_zero=True
) -> PointSequence:
    T = vel_seq.shape[0]
```

```

poses = np.zeros((T, 17, 3))

poses[0] = star_pos + vel_seq[0]

if bassin_en_zero:
    poses[0, 0] = 0

for t in range(1, T):
    poses[t] = poses[t - 1] + vel_seq[t]

    if bassin_en_zero:
        poses[t, 0] = 0
return poses

def make_data_for_conv_lstm(data: list[PointSequence],
window=WINDOW_SIZE, horizon=HORIZON):
    X_all, Y_all = [], []

    for seq in data:
        for i in range(len(seq) - window - horizon):
            X_all.append(seq[i:i+window])
            Y_all.append(seq[i + window : i + window + horizon])

    X_all = np.array(X_all)
    Y_all = np.array(Y_all)

    X_all = X_all.reshape(X_all.shape[0], window, -1)
    Y_all = Y_all.reshape(Y_all.shape[0], horizon, -1)

    # Normalisation
    X_all = (X_all - MEAN_VEL) / STD_VEL
    Y_all = (Y_all - MEAN_VEL) / STD_VEL

    return X_all, Y_all

def inverse_conv_lstm_output(pred):
    pred = pred*STD_VEL+MEAN_VEL
    return pred.reshape(pred.shape[0], HORIZON, 17,3)

def auto_pred_horizon(model, input, nb_frame):
    window = input.copy()
    preds = []

    while len(preds) < nb_frame:
        y = model.predict(window[None], verbose=0)[0]
        preds.extend(y)

        window = np.vstack([window[HORIZON:], y])

```

```
return np.array(preds[:nb_frame])
```

Mesurons à quel point notre modèle mesure correctement la frame suivante :
(HORIZON frames)

En prédiction simple (sans auto-régression)

```
# la moyenne de tous les échantillons :
NB_FRAME = 120

mean_rmse_per_joint = np.zeros((NB_FRAME, 17))
mean_bone_lenght_err = np.zeros((NB_FRAME, len(SQUELETTE)))

for (seq, seq_vel) in zip(test, test_vel):
    Y = seq[:NB_FRAME+WINDOW_SIZE]
    P0 = Y[0]
    Y_v = seq_vel[:NB_FRAME+WINDOW_SIZE]

    X,_ = make_data_for_conv_lstm([Y_v])

    Y_pred_v_blocks = inverse_conv_lstm_output(conv_lstm.predict(X,
        verbose=0))

    Y_pred = np.vstack(Y_pred_v_blocks)[:NB_FRAME]

    Y_pred = compute_position(Y_pred, P0)

    T = min(len(Y_pred), NB_FRAME)

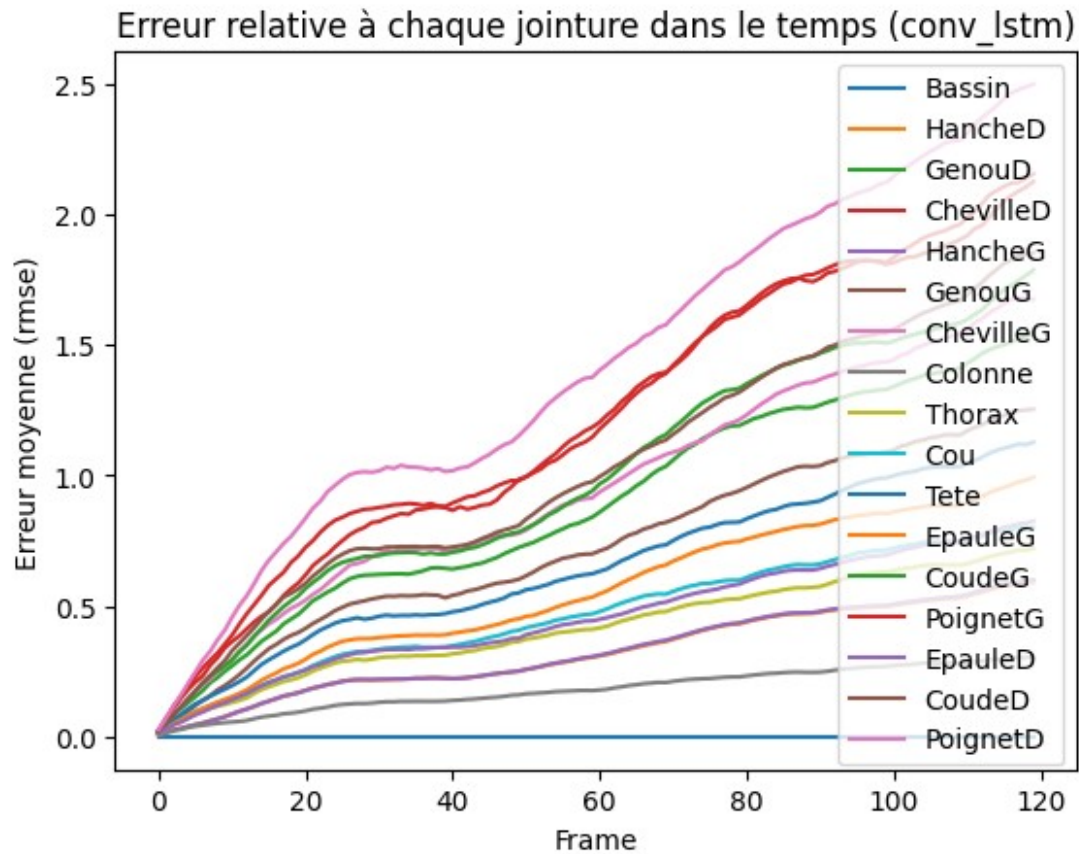
    joint_err = np.linalg.norm(Y[:T] - Y_pred[:T], axis=-1)
    mean_rmse_per_joint[:T] += joint_err

    bone_err = bone_lenght_error(Y[:T], Y_pred[:T])
    mean_bone_lenght_err[:T] += bone_err

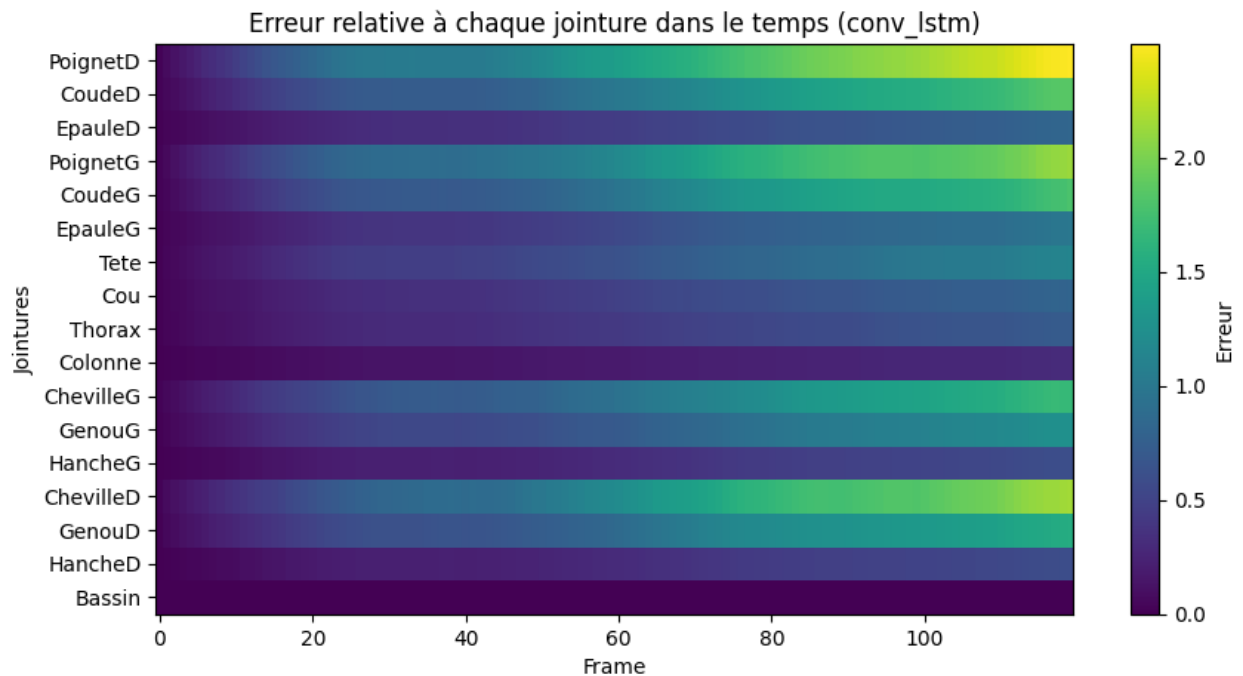
mean_rmse_per_joint /= len(test)
mean_bone_lenght_err /= len(test)
```

Sur les jointures

```
for i in range(NB_JOINTURES):
    plt.plot(mean_rmse_per_joint[:,i], label=JOINTURES[i])
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Erreur moyenne (rmse)")
plt.title("Erreur relative à chaque jointure dans le temps  
(conv_lstm)")
plt.legend()
plt.show()
```

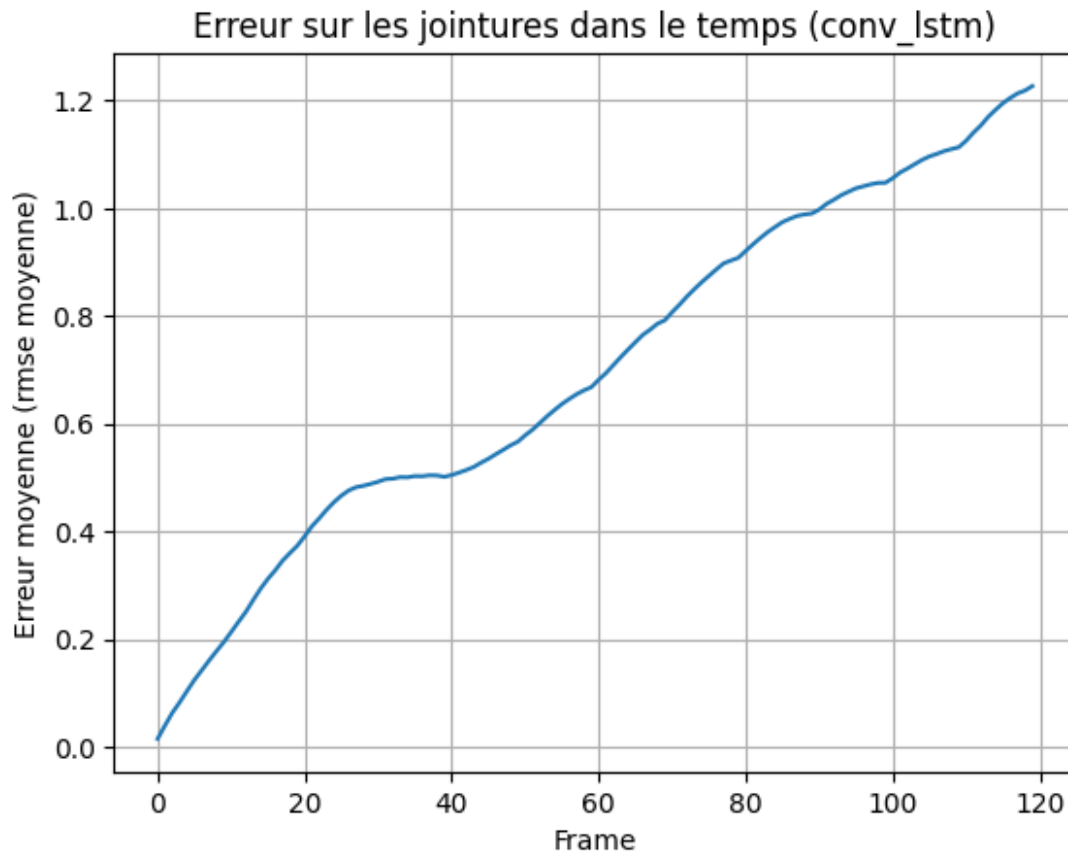


```
plt.figure(figsize=(10,5))
plt.imshow(mean_rmse_per_joint.T, aspect="auto", origin="lower")
plt.colorbar(label="Erreur")
plt.yticks(range(17), JOINTURES)
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Jointures")
plt.title("Erreur relative à chaque jointure dans le temps
(conv_lstm)")
plt.show()
```



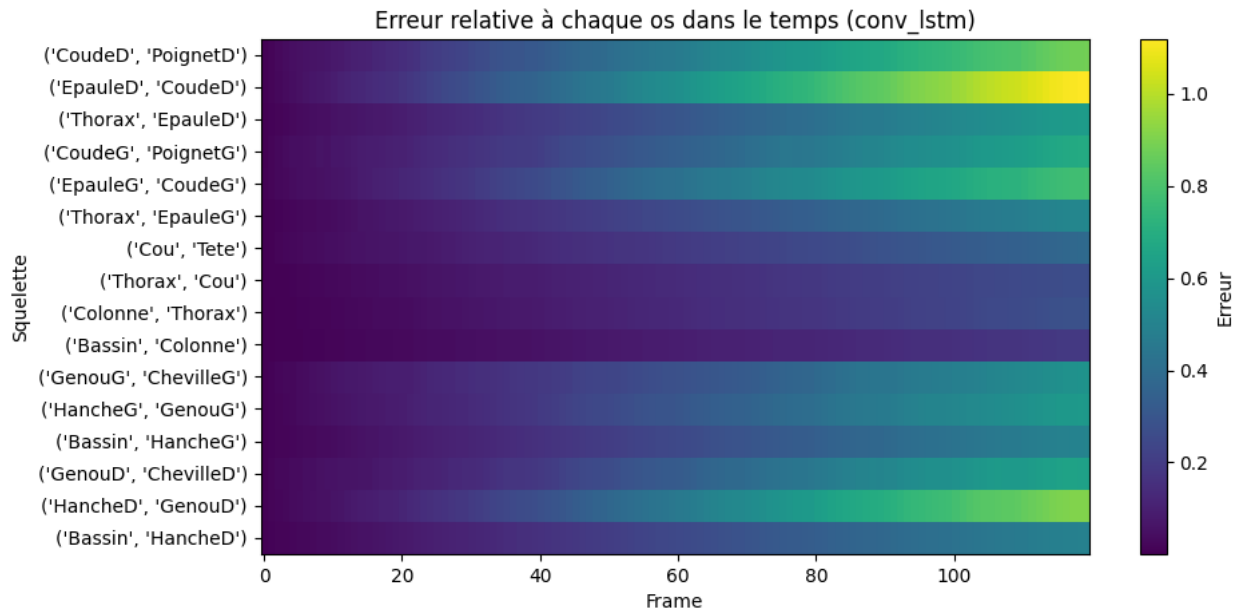
Et en moyenne sur les jointures :

```
mean_joint_err = mean_rmse_per_joint.mean(axis=1)
plt.figure()
plt.plot(mean_joint_err)
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Erreur moyenne (rmse moyenne)")
plt.title("Erreur sur les jointures dans le temps (conv_lstm)")
plt.grid()
plt.show()
```



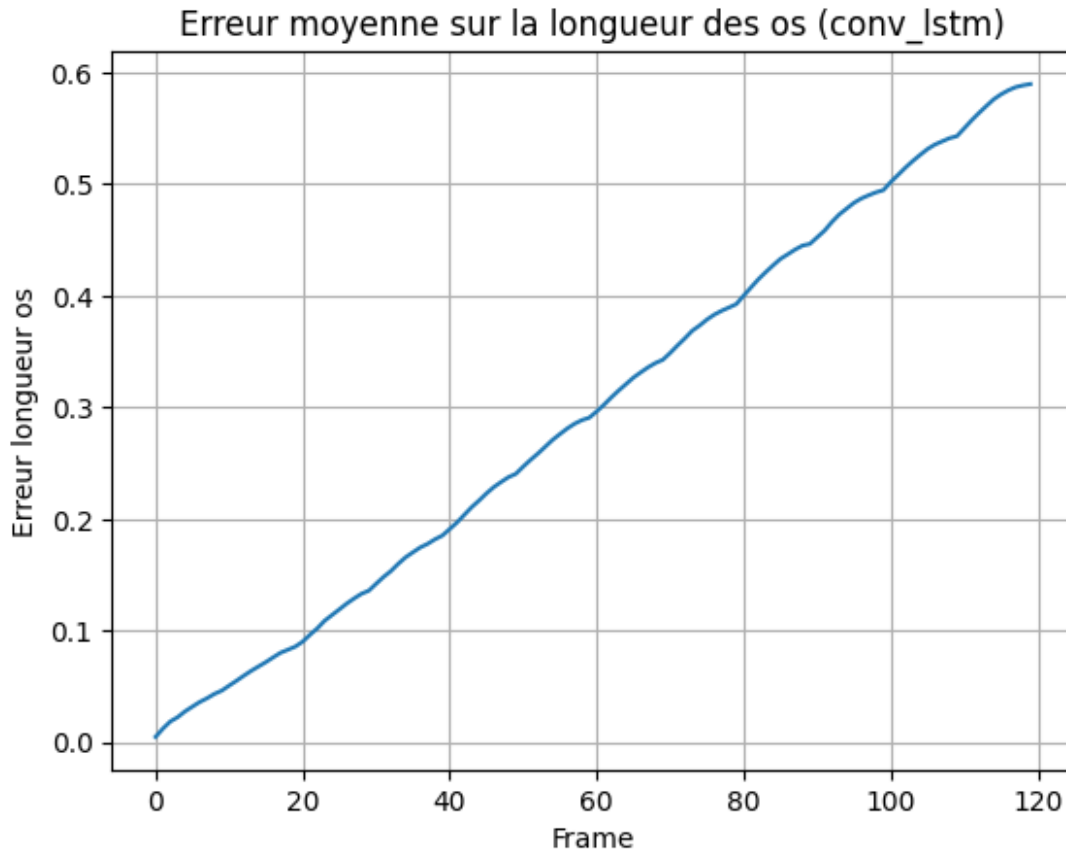
Et sur les os :

```
plt.figure(figsize=(10,5))
plt.imshow(mean_bone_lenght_err.T, aspect="auto", origin="lower")
plt.colorbar(label="Erreur")
labels = [str((JOINTURES[i], JOINTURES[j])) for i,j in SQUELETTE]
plt.yticks(range(len(SQUELETTE)), labels)
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Squelette")
plt.title("Erreur relative à chaque os dans le temps (conv_lstm)")
plt.show()
```



```
bone_time = mean_bone_lenght_err.mean(axis=1)

plt.plot(bone_time)
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Erreur longueur os")
plt.title("Erreur moyenne sur la longueur des os (conv_lstm)")
plt.grid(True)
plt.show()
```

Du au caractère d'accumulation de la vitesse, ce modèle prédit moins bien dans le temps, avec une erreur quasiment linéaire sur les jointures comme sur les os.

En Auto-régression

```
# la moyenne de tous les échantillons :
NB_FRAME = 120
NB_SEQ = 20

mean_rmse_per_joint = np.zeros((NB_FRAME, 17))
mean_bone_lenght_err = np.zeros((NB_FRAME, len(SQUELETTE)))

for seq in test[:NB_SEQ] :
    curr_vel = seq_vel[:WINDOW_SIZE].copy()
    P0 = seq[:WINDOW_SIZE][0]
    preds_vel = []

    while len(preds_vel) < NB_FRAME:
        X = curr_vel.reshape(1, WINDOW_SIZE, -1)
        X = (X - MEAN_VEL) / STD_VEL

        Y_pred_n = conv_lstm.predict(X, verbose=0)
        Y_pred_vel = inverse_conv_lstm_output(Y_pred_n)[0]
```

```

        preds_vel.extend(Y_pred_vel)

        curr_vel = np.vstack([curr_vel[HORIZON:], Y_pred_vel])

    preds_vel = np.array(preds_vel[:NB_FRAME])

    Y_pred = compute_position(preds_vel, P0)
    Y_true = seq[WINDOW_SIZE: WINDOW_SIZE+NB_FRAME]

    T = min(len(Y_pred), NB_FRAME)

    joint_err = np.linalg.norm(Y_true[:T] - Y_pred[:T], axis=-1)
    mean_rmse_per_joint[:T] += joint_err

    # Erreur os
    bone_err = bone_lenght_error(Y_true[:T], Y_pred[:T])
    mean_bone_lenght_err[:T] += bone_err

mean_rmse_per_joint /= len(test[:NB_SEQ])
mean_bone_lenght_err /= len(test[:NB_SEQ])

```

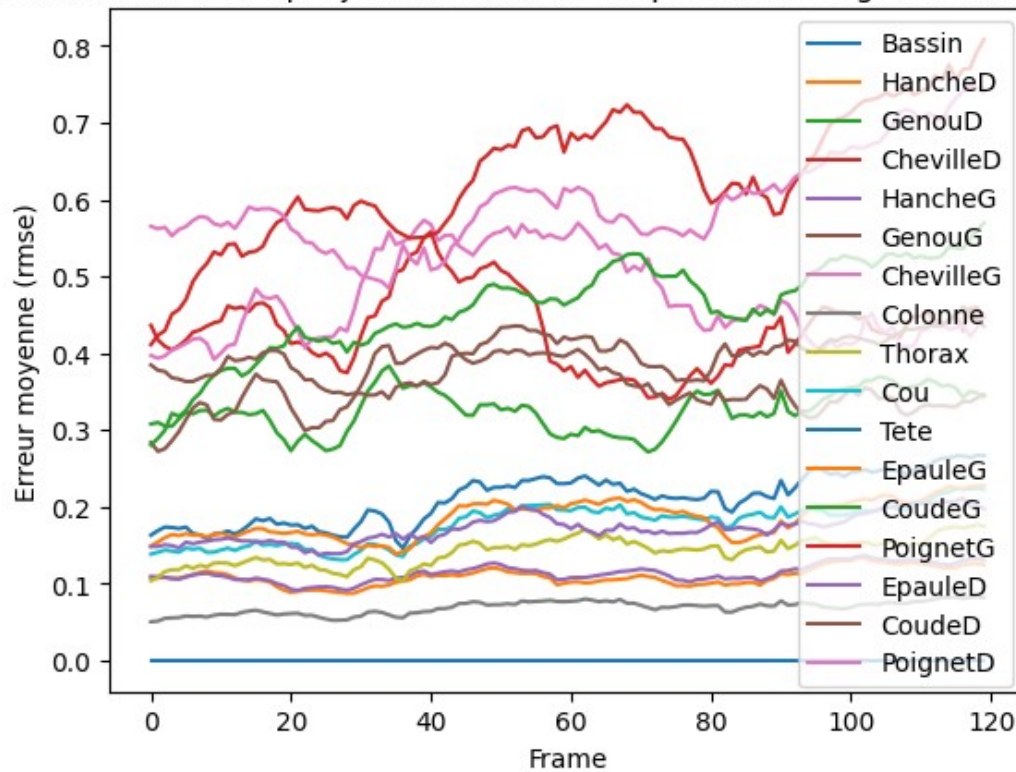
Sur les jointures

```

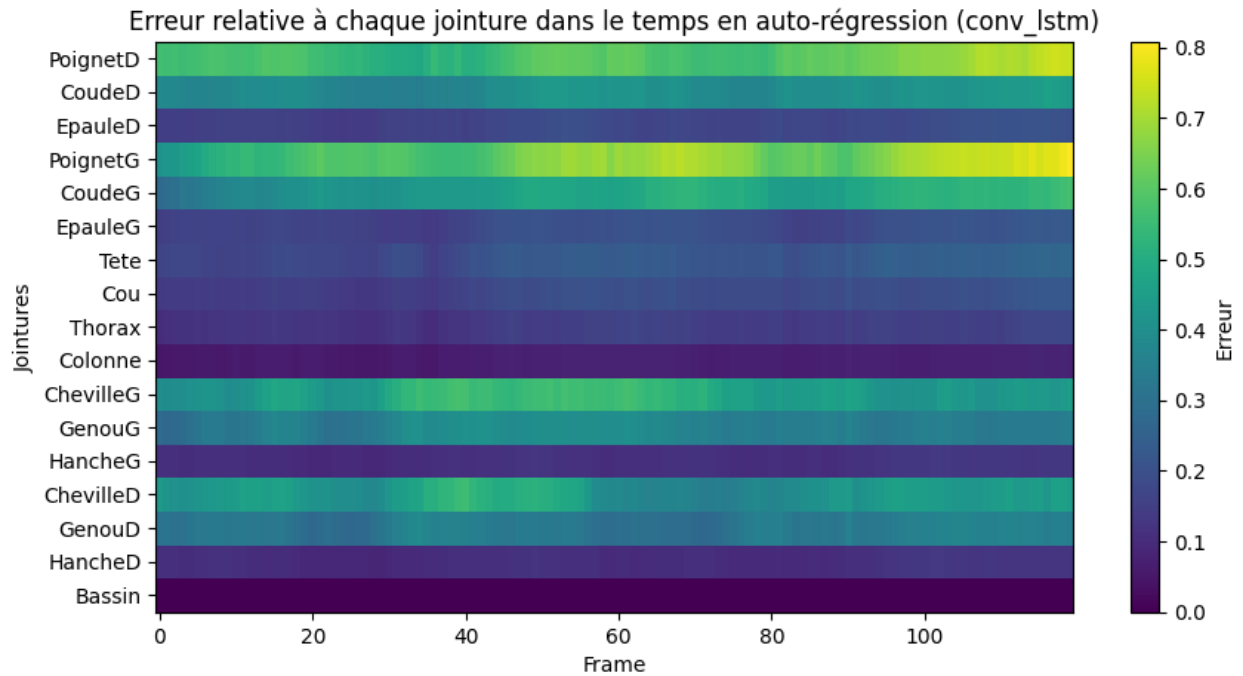
for i in range(NB_JOINTURES):
    plt.plot(mean_rmse_per_joint[:,i], label=JOINTURES[i])
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Erreur moyenne (rmse)")
plt.title("Erreur relative à chaque jointure dans le temps en auto-
régression (conv_lstm)")
plt.legend()
plt.show()

```

Erreur relative à chaque jointure dans le temps en auto-régression (conv_lstm)

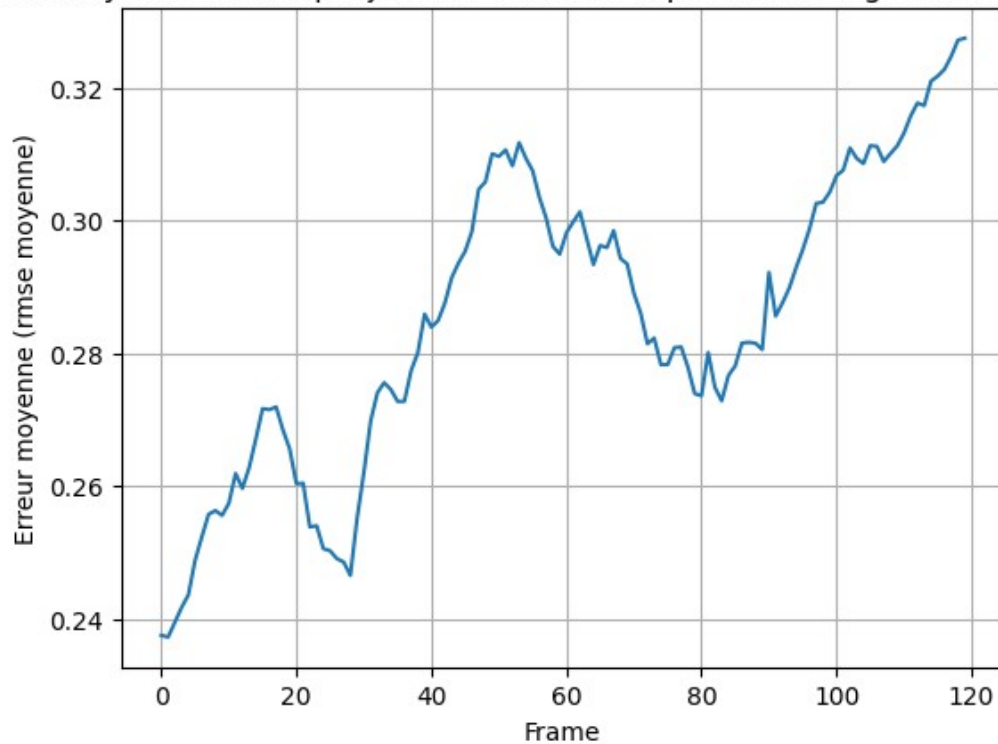


```
plt.figure(figsize=(10,5))
plt.imshow(mean_rmse_per_joint.T, aspect="auto", origin="lower")
plt.colorbar(label="Erreur")
plt.yticks(range(17), JOINTURES)
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Jointures")
plt.title("Erreur relative à chaque jointure dans le temps en auto-
régression (conv_lstm)")
plt.show()
```



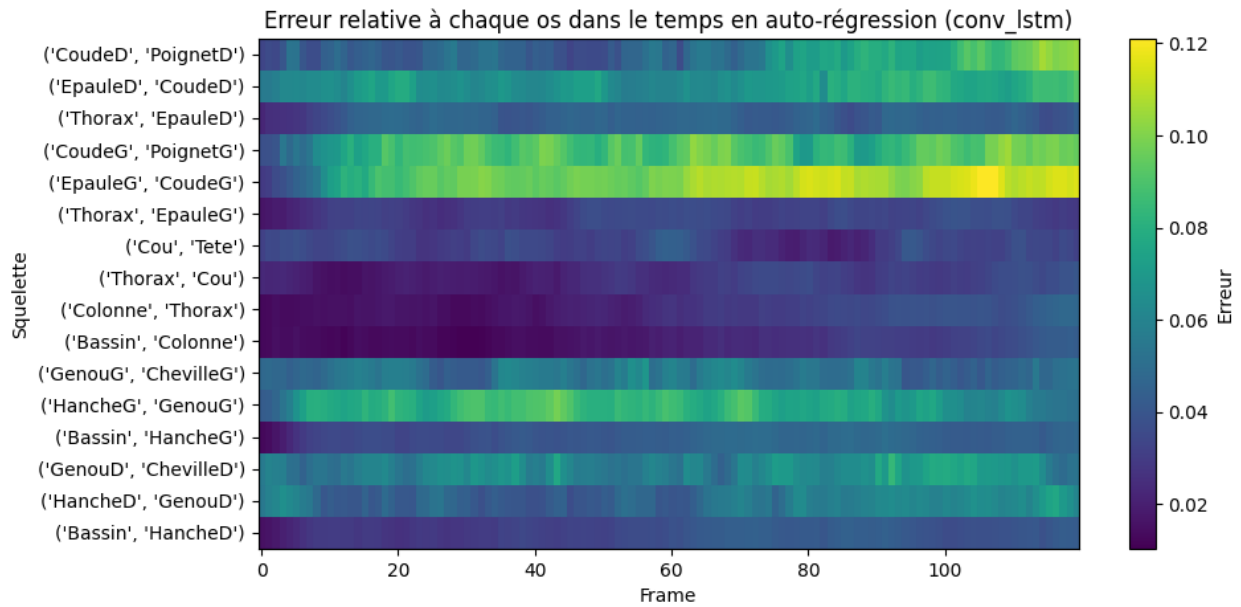
```
mean_joint_err = mean_rmse_per_joint.mean(axis=1)
plt.figure()
plt.plot(mean_joint_err)
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Erreur moyenne (rmse moyenne)")
plt.title("Erreur moyenne de chaque jointure dans le temps en auto-  
régression (conv_lstm)")
plt.grid()
plt.show()
```

Erreur moyenne de chaque jointure dans le temps en auto-régression (conv_lstm)



Et sur les os :

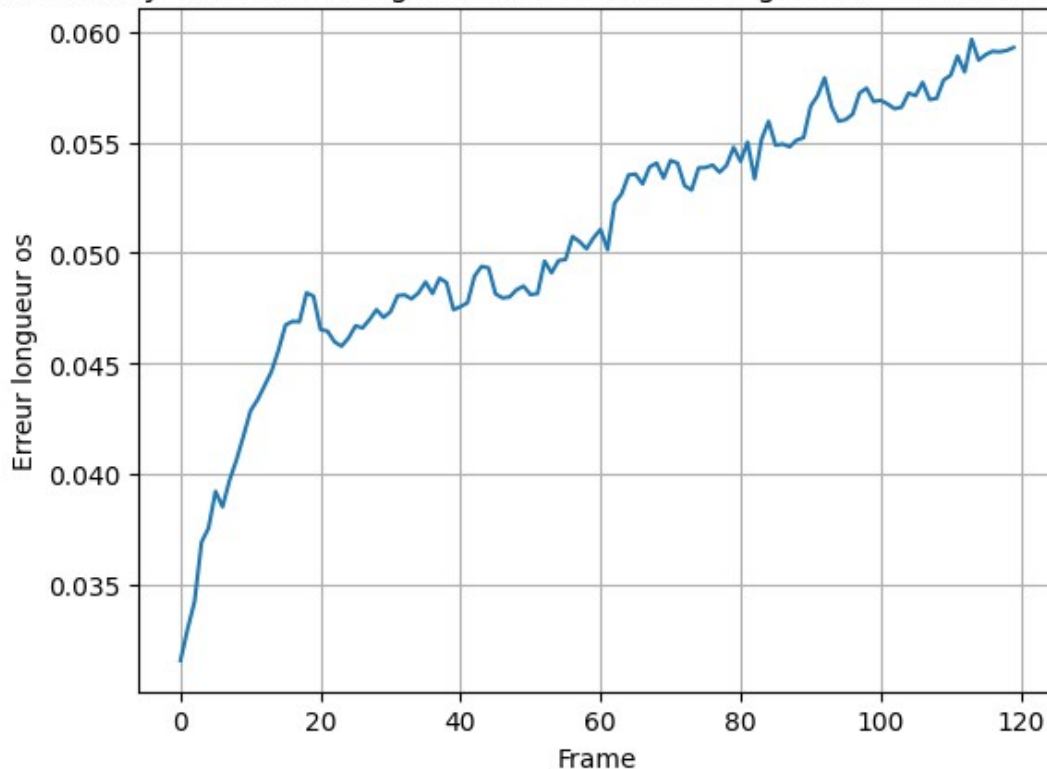
```
plt.figure(figsize=(10,5))
plt.imshow(mean_bone_lenght_err.T, aspect="auto", origin="lower")
plt.colorbar(label="Erreur")
labels = [str((JOINTURES[i], JOINTURES[j])) for i,j in SQUELETTE]
plt.yticks(range(len(SQUELETTE)), labels)
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Squelette")
plt.title("Erreur relative à chaque os dans le temps en auto-
régression (conv_lstm)")
plt.show()
```



```
bone_time = mean_bone_lenght_err.mean(axis=1)

plt.plot(bone_time)
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Erreur longueur os")
plt.title("Erreur moyenne sur la longueur des os en auto-régression --  
Modèle conv_lstm")
plt.grid(True)
plt.show()
```

Erreur moyenne sur la longueur des os en auto-régression -- Modèle conv_lstm



```
del conv_lstm
```

Malgrès le fait que ce modèle prédise moins bien que le dernier sans auto-régression, ce dernier s'en sort beaucoup mieux en auto-régression, avec une erreur comprise entre 0.22 et 0.3 sur les jointures et 0.033 et 0.065 sur les os. On peut aussi noter l'impact de la génération de **HORIZON** frames d'un coup, on voit une périodicité se générer.

Modèle n°3 (dernier modèle)

```
HORIZON = 10
WINDOW_SIZE = 30
NB_FEATURES = len(JOINTURES)*6

#redéfinition des loss
def bone_length_loss(skeleton):
    def loss(y_true, y_pred):

        y_true = tf.reshape(y_true, (-1, tf.shape(y_true)[1], 17, 3))
        y_pred = tf.reshape(y_pred, (-1, tf.shape(y_pred)[1], 17, 3))

        bone_loss = 0.0

        for i, j in skeleton:
            true_len = tf.norm(
```

```

        y_true[:, :, i] - y_true[:, :, j],
        axis=-1
    )
    pred_len = tf.norm(
        y_pred[:, :, i] - y_pred[:, :, j],
        axis=-1
    )
    bone_loss += tf.reduce_mean(tf.square(pred_len -
true_len))

    return bone_loss / len(skeleton)

return loss

def smooth_vel_loss(horizon=HORIZON):
    def loss(_y_true, y_pred):
        yp = tf.reshape(y_pred, (-1, horizon, 17, 3))
        vel = yp[:,1:] - yp[:,-1]
        return tf.reduce_mean(tf.square(vel))

    return loss

def total_loss(skeleton, base_loss = tf.losses.mse, bone_loss_w= 0.05,
smooth_loss_w= 0.01, horizon=HORIZON):
    bone_loss = bone_length_loss(skeleton)
    smooth_loss = smooth_vel_loss(horizon=horizon)
    def loss(y_true, y_pred):
        return base_loss(y_true, y_pred) + bone_loss_w *
bone_loss(y_true, y_pred) + smooth_loss_w* smooth_loss(y_true, y_pred)
    return loss

# Chargement du modèle :
model_pos_vel = load_model(
    MODEL_PATH+"model_pos_vel.keras",
    custom_objects={
        "loss": total_loss(
            SQUELETTE,
        )
    }
)

model_pos_vel.summary()
Model: "sequential_2"

```

Layer (type)	Output Shape	
Param #		

conv1d_2 (Conv1D)	(None, 26, 128)	
65,408		
batch_normalization_2	(None, 26, 128)	
512		
(BatchNormalization)		
conv1d_3 (Conv1D)	(None, 24, 128)	
49,280		
batch_normalization_3	(None, 24, 128)	
512		
(BatchNormalization)		
lstm_3 (LSTM)	(None, 256)	
394,240		
repeat_vector (RepeatVector)	(None, 10, 256)	
0		
lstm_4 (LSTM)	(None, 10, 256)	
525,312		
dense_2 (Dense)	(None, 10, 51)	
13,107		

Total params: 3,144,091 (11.99 MB)

Trainable params: 1,047,859 (4.00 MB)

Non-trainable params: 512 (2.00 KB)

Optimizer params: 2,095,720 (7.99 MB)

```
def make_data_for_pos_vel(data_pos: list[PointSequence] ,
window=WINDOW_SIZE, horizon=HORIZON):
    X_all, Y_all = [], []
```

```

for pos_seq in data_pos:
    # calcule de la vitesse localement
    vel_seq = np.zeros_like(pos_seq)
    vel_seq[1:] = pos_seq[1:] - pos_seq[:-1]

    #normalisation
    pos_norm = (pos_seq-MEAN_POS_3D) / STD_POS_3D
    vel_norm = (vel_seq-MEAN_VEL_3D) / STD_VEL_3D

    # concatenation
    pos_vel = np.concatenate([pos_norm, vel_norm], axis=-1)

    #création de la fenêtre
    for i in range(len(pos_vel) - window - horizon):
        X_all.append(pos_vel[i : i + window])
        Y_all.append(pos_norm[i + window : i + window +
horizon, :])

    return np.array(X_all).reshape(-1, window, NB_FEATURES), \
           np.array(Y_all).reshape(-1, horizon, 17*3)

def inverse_pos_vel_output(pred_norm):
    pred = np.array(pred_norm)

    if pred.ndim == 3:
        B, H, F = pred.shape
        pred = pred.reshape(B * H, F)
    elif pred.ndim == 2:
        pass

    # dénormalisation pos
    pred = pred * STD_POS + MEAN_POS

    # reshape en squelette
    pred = pred.reshape(pred.shape[0], 17, 3)

    return pred

def auto_pred_pos_vel(model, seq_pos, nb_frames,
                      window=WINDOW_SIZE, horizon=HORIZON):

    curr_pos = seq_pos[:window].copy()
    preds = []

    while len(preds)<nb_frames:
        # calcule de la vitesse localement

```

```

    vel_seq = np.zeros_like(curr_pos)
    vel_seq[1:] = curr_pos[1:] - curr_pos[:-1]

    # normalisation
    pos_n = (curr_pos - MEAN_POS_3D) / STD_POS_3D
    vel_n = (vel_seq - MEAN_VEL_3D) / STD_VEL_3D

    X = np.concatenate([pos_n, vel_n], axis=-1).reshape(1,
WINDOW_SIZE, -1)

    # on fait la prédiction
    Y_norm = model.predict(X, verbose=0)[0]

    #dénormalisation de la prédiction
    Y = Y_norm.reshape(horizon, 17, 3)
    Y = Y * STD_POS_3D + MEAN_POS_3D

    # màj des predictions
    for f in range(horizon):
        preds.append(Y[f])

    curr_pos = np.vstack([curr_pos[horizon:], Y])

    return np.array(preds[:nb_frames])

```

Mesurons à quel point notre modèle mesure corectement les frames suivante :
(HORIZON frames)

En prédiction simple (sans auto-régression)

```

NB_FRAME = 120
NB_SEQ = 20

mean_rmse_per_joint = mean_rmse_per_joint = np.zeros((NB_FRAME, 17))
mean_bone_lenght_err = np.zeros((NB_FRAME, len(SQUELETTE)))

for seq in test[:NB_SEQ]:
    Y = seq[:NB_FRAME + WINDOW_SIZE]

    X, _ = make_data_for_pos_vel([Y])

    Y_pred_n = model_pos_vel.predict(X, verbose=0)
    Y_pred = inverse_pos_vel_output(Y_pred_n)

    Y_true = Y[WINDOW_SIZE:WINDOW_SIZE+len(Y_pred)]

    T = min(len(Y_pred), NB_FRAME)

    joint_err = np.linalg.norm(Y_true[:T] - Y_pred[:T], axis=-1)
    mean_rmse_per_joint[:T] += joint_err

```

```

bone_err = bone_lenght_error(Y_true[:T], Y_pred[:T])
mean_bone_lenght_err[:T] += bone_err

mean_rmse_per_joint /= len(test[:NB_SEQ])
mean_bone_lenght_err /= len(test[:NB_SEQ])

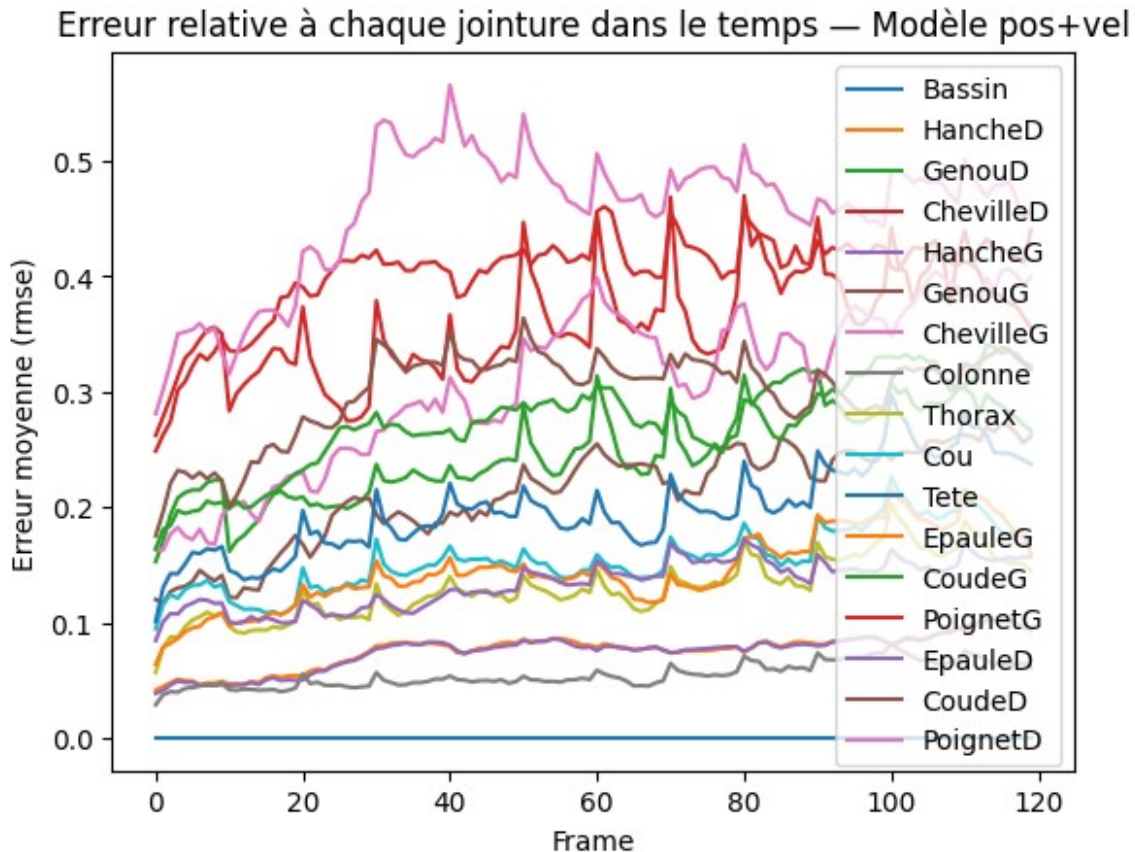
```

Sur les jointures

```

for i in range(NB_JOINTURES):
    plt.plot(mean_rmse_per_joint[:,i], label=JOINTURES[i])
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Erreur moyenne (rmse)")
plt.title("Erreur relative à chaque jointure dans le temps – Modèle pos+vel")
plt.legend()
plt.show()

```

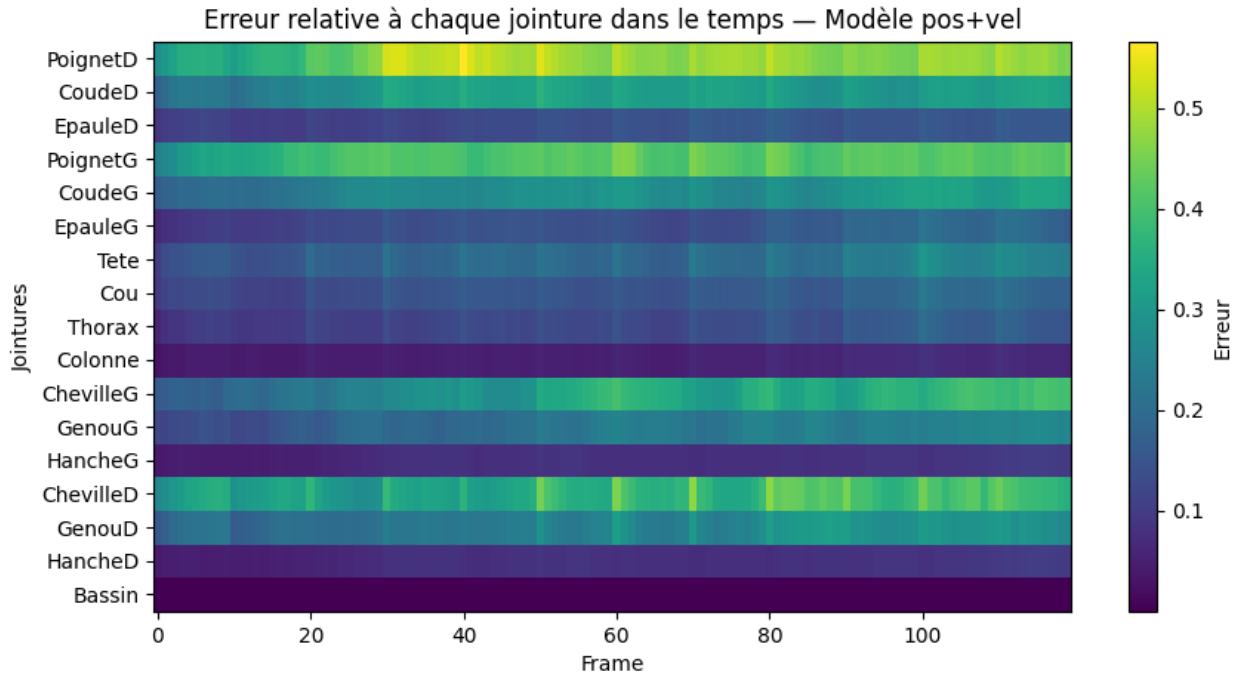


```

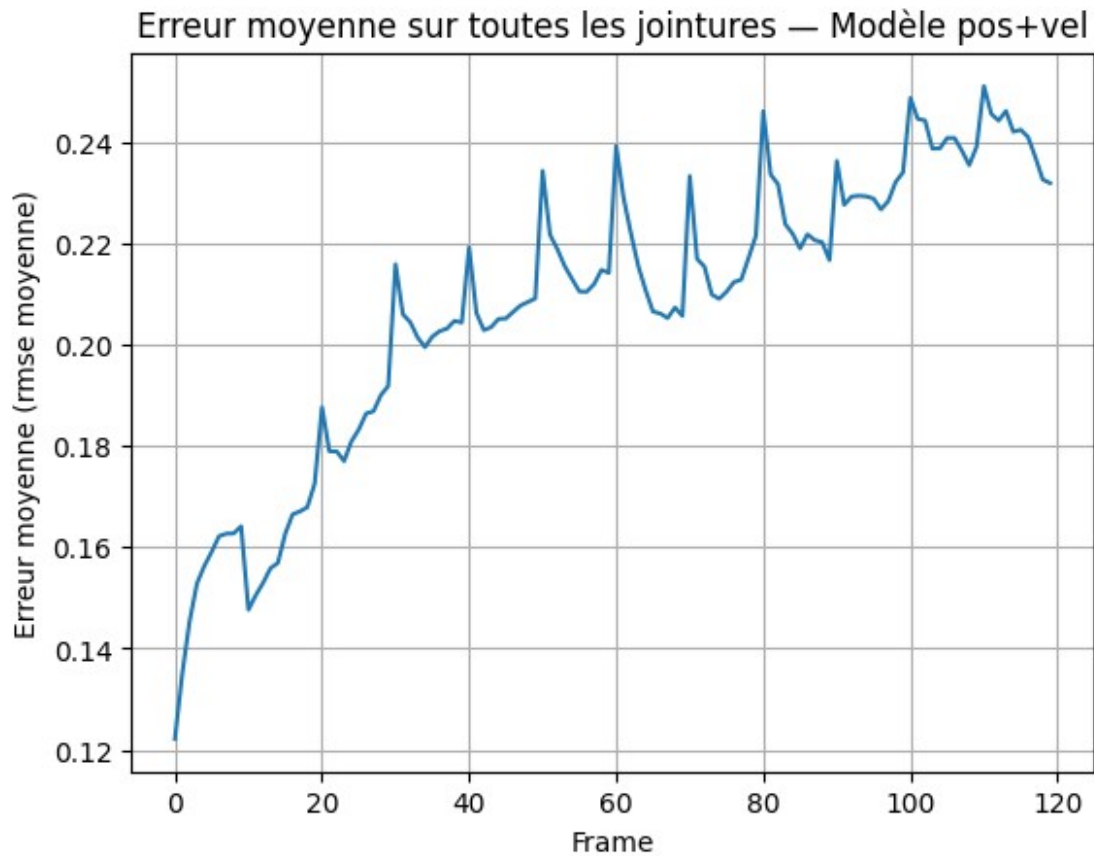
plt.figure(figsize=(10,5))
plt.imshow(mean_rmse_per_joint.T, aspect="auto", origin="lower")
plt.colorbar(label="Erreur")
plt.yticks(range(17), JOINTURES)
plt.xlabel("Frame")

```

```
plt.ylabel("Jointures")
plt.title("Erreur relative à chaque jointure dans le temps – Modèle pos+vel")
plt.show()
```

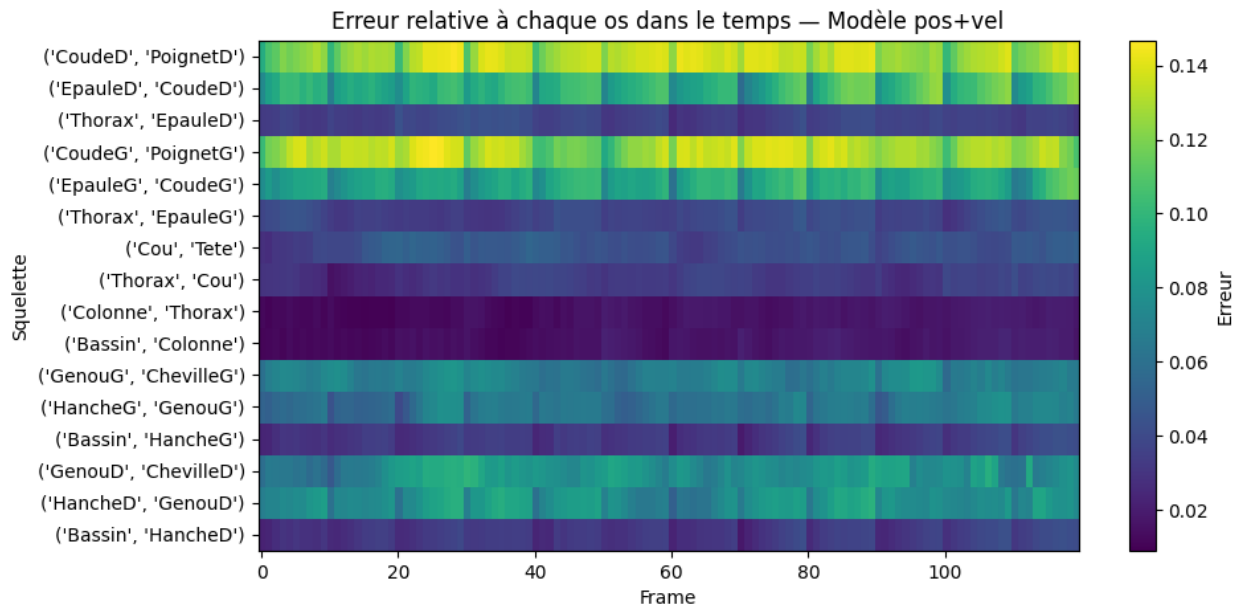


```
mean_joint_err = mean_rmse_per_joint.mean(axis=1)
plt.figure()
plt.plot(mean_joint_err)
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Erreur moyenne (rmse moyenne)")
plt.title("Erreur moyenne sur toutes les jointures – Modèle pos+vel")
plt.grid()
plt.show()
```

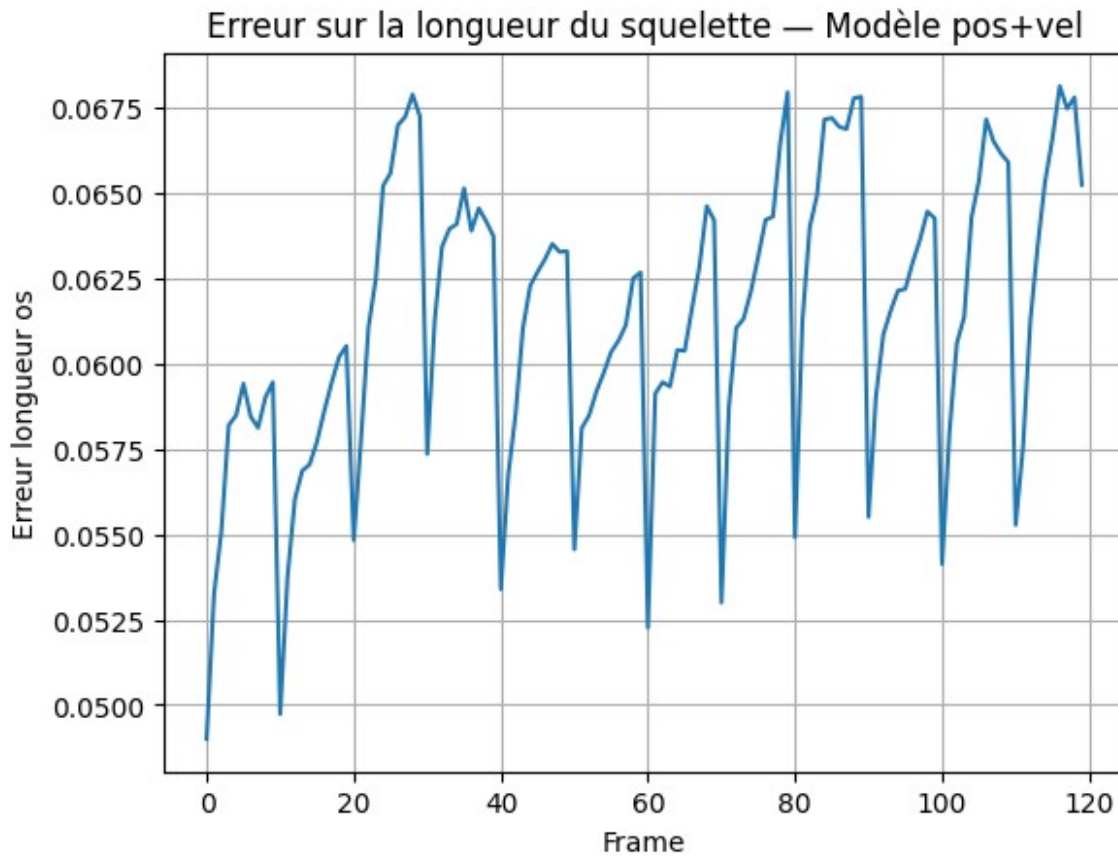


Et sur les os

```
plt.figure(figsize=(10,5))
plt.imshow(mean_bone_lenght_err.T, aspect="auto", origin="lower")
plt.colorbar(label="Erreur")
labels = [str((JOINTURES[i], JOINTURES[j])) for i,j in SQUELETTE]
plt.yticks(range(len(SQUELETTE)), labels)
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Squelette")
plt.title("Erreur relative à chaque os dans le temps – Modèle
pos+vel")
plt.show()
```



```
bone_time = mean_bone_lenght_err.mean(axis=1)
plt.plot(bone_time)
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Erreur longueur os")
plt.title("Erreur moyenne sur la longueur des os – Modèle pos+vel")
plt.grid(True)
plt.show()
```



Ce modèle prédit relativement bien les prochaines frames sans auto-régression, avec de meilleurs résultats sur les erreurs par jointures, mais de moins bons résultats sur les erreurs par os, malgré la loss qui prends ces derniers en compte.

En auto-régression

```
NB_FRAME = 120
NB_SEQ = 20

mean_rmse_per_joint = np.zeros((NB_FRAME, 17))
mean_bone_lenght_err = np.zeros((NB_FRAME, len(SQUELETTE)))

for seq in test[:NB_SEQ] :
    X = seq
    Y_true = X[WINDOW_SIZE:WINDOW_SIZE+NB_FRAME]

    Y_pred = auto_pred_pos_vel(model_pos_vel, X, NB_FRAME)

    T = min(len(Y_pred), NB_FRAME)

    joint_err = np.linalg.norm(Y_true[:T] - Y_pred[:T], axis=-1)
    bone_err = bone_lenght_error(Y_true[:T], Y_pred[:T])

    mean_rmse_per_joint[:T] += joint_err
```

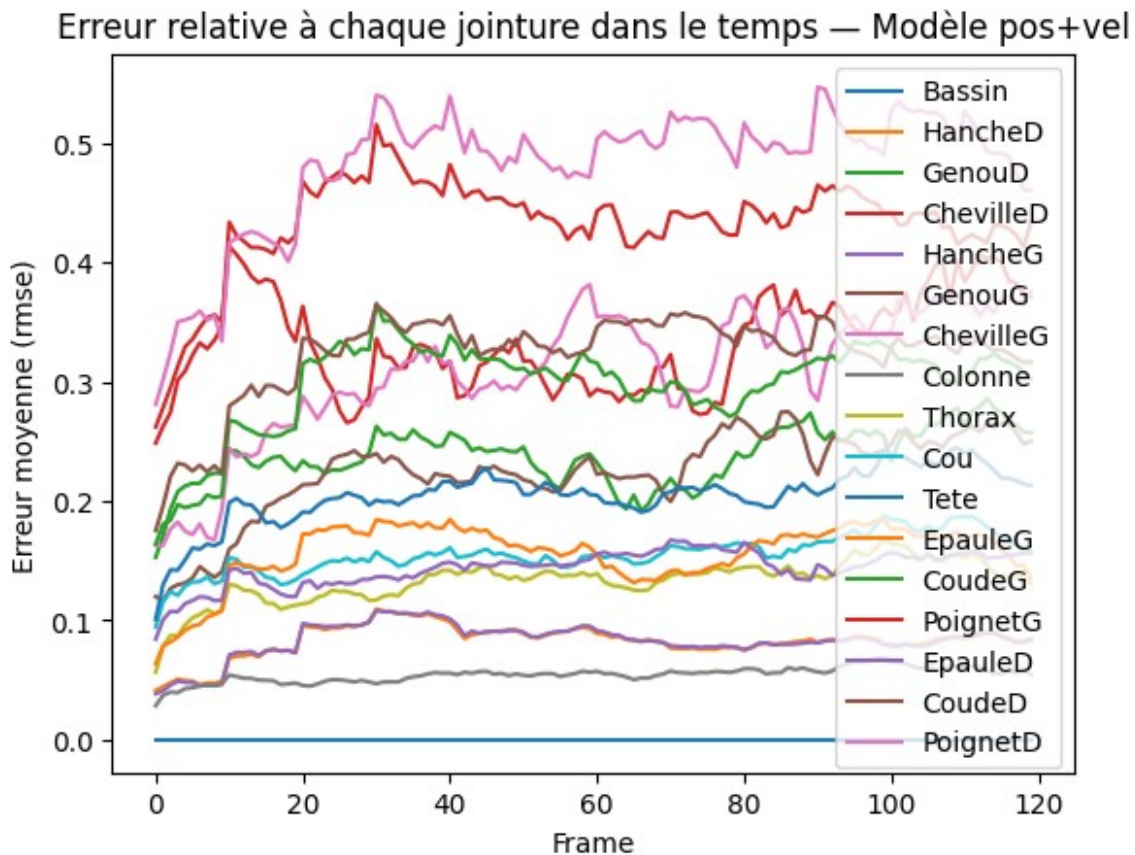


```
mean_bone_lenght_err[:T] += bone_err
```

```
mean_rmse_per_joint /= len(test[:NB_SEQ])
mean_bone_lenght_err /= len(test[:NB_SEQ])
```

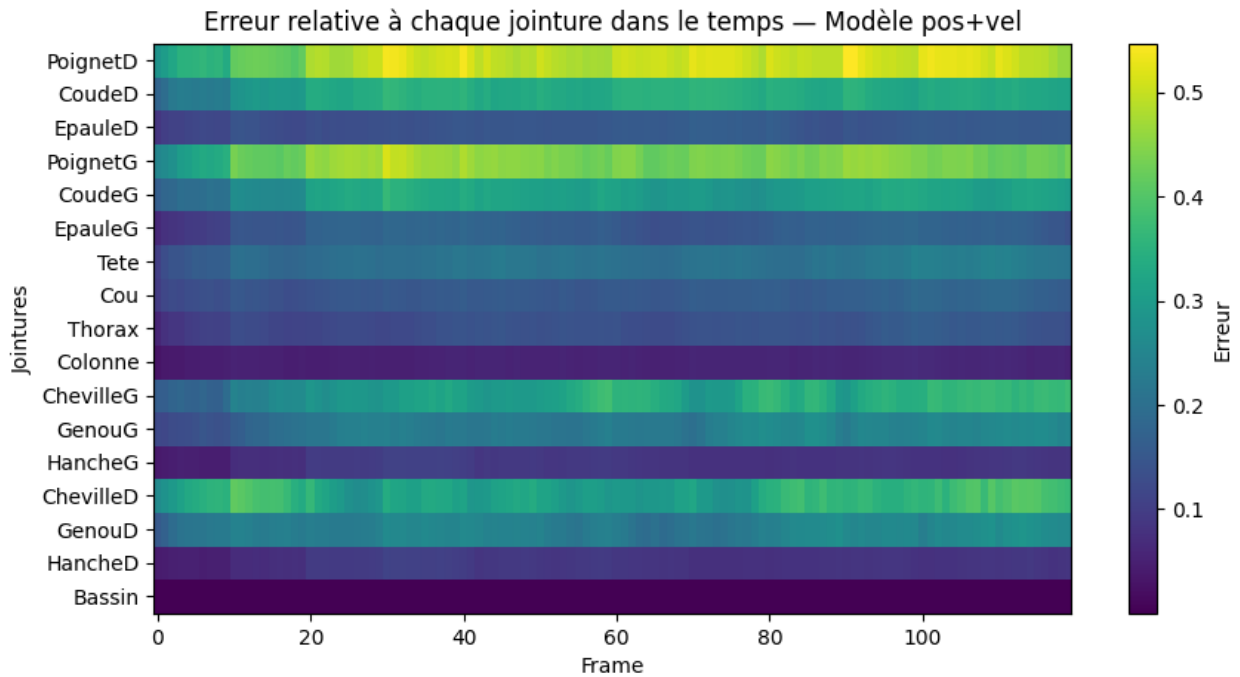
Sur les jointures

```
for i in range(NB_JOINTURES):
    plt.plot(mean_rmse_per_joint[:,i], label=JOINTURES[i])
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Erreur moyenne (rmse)")
plt.title("Erreur relative à chaque jointure dans le temps – Modèle pos+vel")
plt.legend()
plt.show()
```

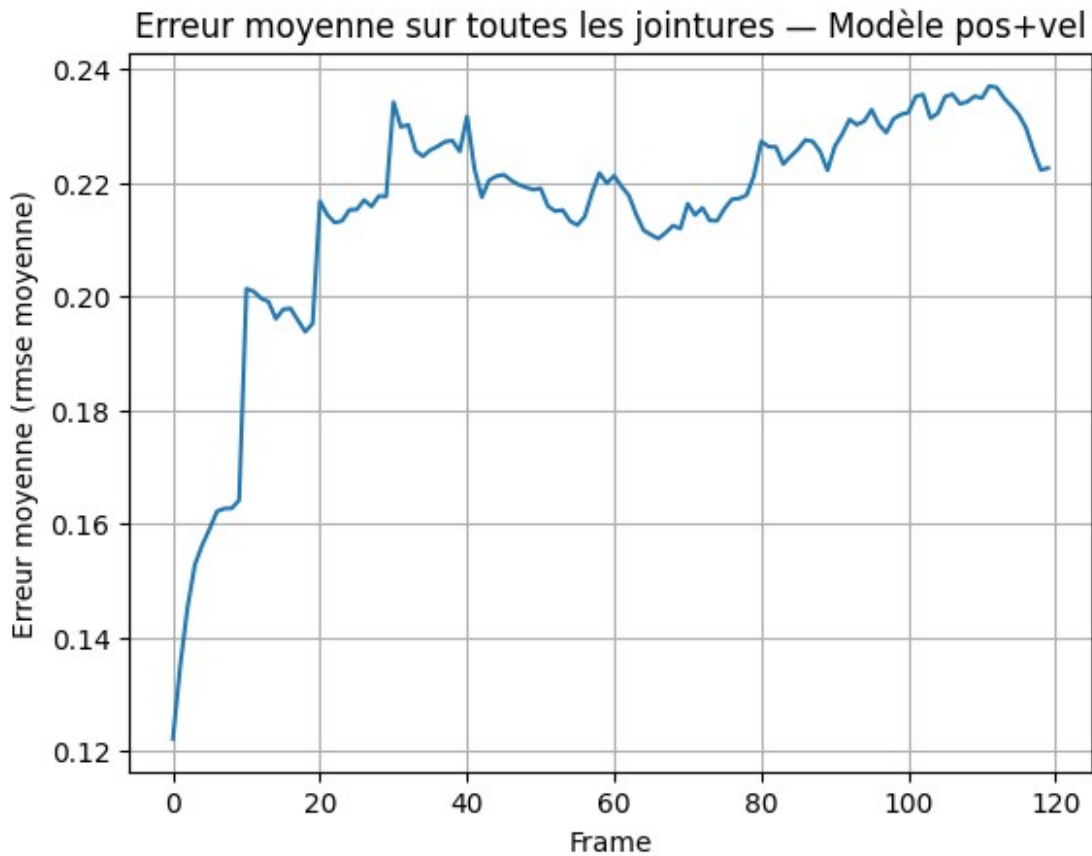


```
plt.figure(figsize=(10,5))
plt.imshow(mean_rmse_per_joint.T, aspect="auto", origin="lower")
plt.colorbar(label="Erreur")
plt.yticks(range(17), JOINTURES)
plt.xlabel("Frame")
```

```
plt.ylabel("Jointures")
plt.title("Erreur relative à chaque jointure dans le temps – Modèle pos+vel")
plt.show()
```

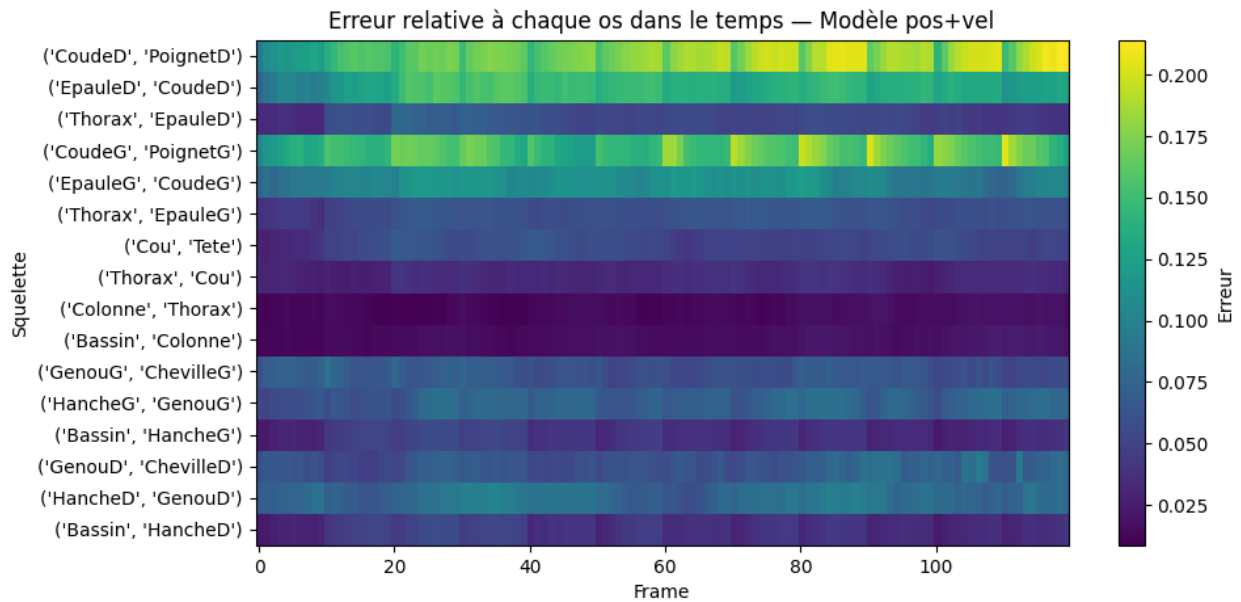


```
mean_joint_err = mean_rmse_per_joint.mean(axis=1)
plt.figure()
plt.plot(mean_joint_err)
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Erreur moyenne (rmse moyenne)")
plt.title("Erreur moyenne sur toutes les jointures – Modèle pos+vel")
plt.grid()
plt.show()
```

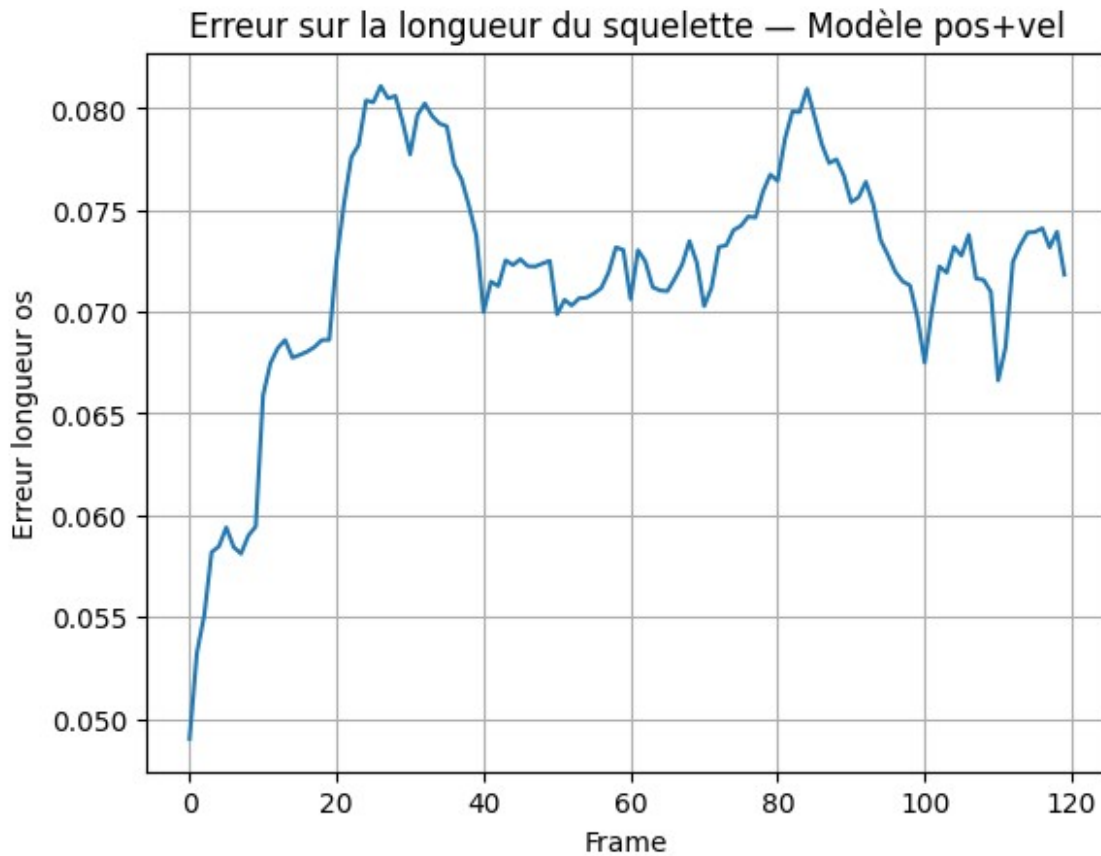


Et sur les os :

```
plt.figure(figsize=(10,5))
plt.imshow(mean_bone_lenght_err.T, aspect="auto", origin="lower")
plt.colorbar(label="Erreur")
labels = [str((JOINTURES[i], JOINTURES[j])) for i,j in SQUELETTE]
plt.yticks(range(len(SQUELETTE)), labels)
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Squelette")
plt.title("Erreur relative à chaque os dans le temps – Modèle
pos+vel")
plt.show()
```



```
bone_time = mean_bone_lenght_err.mean(axis=1)
plt.plot(bone_time)
plt.xlabel("Frame")
plt.ylabel("Erreur longueur os")
plt.title("Erreur sur la longueur des os en auto-régression — Modèle pos+vel")
plt.grid(True)
plt.show()
```



```
del model_pos_vel
```

Finalement ce dernier modèle performe bien, on voit une nette amélioration par rapport au deux premiers modèles, mais il faut noter que ce dernier est beaucoup plus coûteux à entraîner, et notamment, très demandant en mémoire vive, du à sa taille, et au données d'entrer qui sont doublées en input.

On peut toujours voir des "cassure" comme pour le deuxième modèle, du à la génération de **HORIZON** frames à la fois, mais l'effet est beaucoup moindre.

Malgrès la loss, qui prend en compte la longueur des os, le modèle a une erreur plus forte sur ce critère, mais plus stable dans le temps.

Peut être faut-il augmenter le poids de la loss associée, ou changer l'implémentation.